

ВКС-21

Казань 2017

**XXI Всероссийская
конференция
по физике
сегнетоэлектриков**

**СБОРНИК
ТЕЗИСОВ**

**25 – 30 июня, 2017
Казань, Россия**



**XXI Всероссийская конференция
по физике сегнетоэлектриков
(ВКС-XXI)**

Сборник трудов

25-30 июня, 2017

Казань, Россия

Подписано к печати 20.06.2017.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Формат 60x84 1/16. Гарнитура "Time New Roman". Усл. печ.л. 15,86.

Уч.-изд. Л. 16.64. Тираж 192 экз. Заказ 196/6.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства Казанского университета

420008 г. Казань, улю Профессора Нужина, 1/37
тел. (843) 233-73-59, 233-73-28

Организаторы

Министерство образования и науки РФ
Федеральное агентство научных организаций
Российская академия наук
Научный совет РАН по физике конденсированных сред
Казанский федеральный университет
Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН

Организационный комитет

Сопредседатели

Сигов А.С., Московский государственный технический университет
Таюрский Д.А., Казанский федеральный университет
Калачев А.А. Казанский физико-технический институт

Заместители председателя

Чугуева И.Н., Федеральное агентство научных организаций
Мамин Р.Ф. Казанский физико-технический институт

Члены оргкомитета

Афанасьев В.П. (С.-Петербург), Волков А.А. (Москва), Голенищев-Кутузов В.А. (Казань), Гриднев С.А. (Воронеж), Иванова Е.С. (Москва), Малиновский В.К. (Новосибирск), Малкин Б.З. (Казань), Никитин С.И. (Казань), Сахненко В.П. (Ростов-на-Дону), Флёрв И.Н. (Красноярск), Шур В.Я. (Екатеринбург).

Ученый секретарь

Юсупов Р.В., Казанский федеральный университет

Программный комитет

Сопредседатели

Вахрушев С.Б., Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Волк Т.Р. Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова

Заместитель председателя

Мамин Р.Ф. Казанский физико-технический институт

Члены программного комитета

Воротилов К.А. (Москва), Зиненко В.И. (Красноярск), Малкин Б.З. (Казань), Раевский И.П. (Ростов-на-Дону), Сахненко В.П. (Ростов-на-Дону), Политова Е.Д. (Москва), Шнайдштейн И.В. (Москва)

Локальный оргкомитет

Калачев А.А., и.о. Директора КФТИ КазНЦ РАН (сопредседатель)
Никитин С.И. и.о. Директора Института физики КФУ
(сопредседатель)
Мамин Р.Ф., (зам. председателя)
Юсупов Р.В. (зам. председателя)
Зиганшина С.А. (секретарь)
Поляков Н.В., зам. директора Института физики КФУ
Аджалиев Ю.А., зам. директора КФТИ КазНЦ РАН
Савостина Л.И., зам. директора Института физики КФУ
Ахмин С.М., КФТИ КазНЦ РАН
Байбеков Э.И., КФУ
Воронова Л.В., КФТИ КазНЦ РАН
Гаврилова Т.П., КФТИ КазНЦ РАН
Галеев Р.Т., КФТИ КазНЦ РАН
Голенева В.М., КФТИ КазНЦ РАН
Гусева Р.Р., КФТИ КазНЦ РАН
Гафуров М.Р., КФУ
Зверев Д.Г., КФУ
Клековкина В.В., КФУ
Куприянова О.О., КФТИ КазНЦ РАН
Куркина Н.Г., КФТИ КазНЦ РАН
Лысогорский Ю.В., КФУ
Недопекин О.В., КФУ
Петрова А.В., КФУ
Фазлижанов И.И., КФТИ КазНЦ РАН
Шапошникова Т.С., КФТИ КазНЦ РАН
Шамсутдинова З.З., КФТИ КазНЦ РАН
Чукланов А.П., КФТИ КазНЦ РАН
Юртаева С.В., КФТИ КазНЦ РАН

Спонсоры



Российский фонд фундаментальных исследований



Федеральное агентство научных организаций



Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН



Казанский федеральный университет

**ПРИГЛАШЕННЫЕ
И УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ**

Справедливость теоремы Имри и Ма в системах с дефектами типа «случайное локальное поле»

Сигов А.С.¹, Берзин А.А.¹, Морозов А.И.²

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454, Россия
(E-mail: assigov@yandex.ru)

²Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный, 141701, Россия

После выхода в 1975 г. классической работы Имри и Ма [1] в физике неупорядоченных систем прочно установилась точка зрения, что в пространстве размерности $d < 4$ введение сколь угодно малой концентрации дефектов типа «случайное локальное поле» в систему с непрерывной симметрией n -компонентного векторного параметра порядка приводит к исчезновению дальнего порядка и появлению неоднородного состояния, которое в дальнейшем будем называть состоянием Имри-Ма, а само утверждение – теоремой Имри и Ма. Теорема справедлива только в отсутствие анизотропии системы. Наличие слабой анизотропии типа «легкая ось» приводит к тому, что разрушение дальнего порядка и возникновение неоднородного состояния Имри-Ма происходит при превышении концентрацией дефектов некоторого критического значения [2]. Анизотропное распределение направлений случайных локальных полей дефектов в n -мерном пространстве параметра порядка ведет к возникновению в системе индуцируемой дефектами эффективной анизотропии [3]. Она может быть как типа «легкая плоскость», так и типа «легкая ось». Рассмотрим эти случаи последовательно.

Если проекции случайных полей на легкую плоскость равны нулю, то поведение системы аналогично поведению чистой системы с числом компонент параметра порядка, соответствующим размерности этой плоскости. Если в самой легкой плоскости имеет место анизотропия типа «легкая ось», то задача сводится к задаче с такой анизотропией. Если распределение проекций случайных локальных полей дефектов на легкую плоскость является идеально изотропным, то теорема Имри и Ма справедлива.

Для того, чтобы понять, реализуется ли в системе с эффективной анизотропией типа «легкая ось» неупорядоченное состояние Имри-Ма, необходимо сравнить величину константы эффективной анизотропии K_{eff} с критическим значением K_{cr} , при котором происходит подавление указанного состояния [2]. Эффективная анизотропия, вызванная полями дефектов, пропорциональна их концентрации. В то же время в пространстве с размерностью $2 < d < 4$ величина K_{cr} содержит более высокую степень концентрации дефектов. В частности, в случае трехмерного координатного пространства $K_{cr} \sim x^2$. Из этого следует, что в пределе $x \rightarrow 0$ эффективная анизотропия будет превосходить критическое значение. Таким образом, теорема Имри и Ма несправедлива при любой сколь угодно слабой эффективной анизотропии типа «легкая ось», индуцированной случайными локальными полями дефектов. В случае сильно анизотропных распределений случайных полей, создающих анизотропию типа «легкая ось», состояние Имри-Ма не реализуется во всем возможном диапазоне концентраций дефектов $x < 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Imry Y. Ma and S.-k. Phys. Rev. Lett. **35**, 1399 (1975).
2. Морозов А. И., Сигов А. С. Письма в ЖЭТФ **90**, 818 (2009).
3. Берзин А.А., Морозов А.И., Сигов А.С. ФТТ **58**, 1614 (2016).

Диэлектрические свойства двуслойных структур $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ на подложках из монокристаллического кремния

Бирюков С.В., Головки Ю.И., Мухортов В.М.

Южный научный центр РАН (E-mail mukhortov1944@mail.ru)

Важнейшими областями использования сегнетоэлектрических пленок в микроэлектронике являются энергонезависимая память (FeRAM), микроэлектромеханические системы и т.д. Вследствие этого следует отметить, что выбор активного материала в гетероструктурах сегнетоэлектрик – полупроводник и изучение влияния спонтанной поляризации пленок на их свойства являются актуальными задачами.

В настоящей работе исследовались двуслойные гетероструктуры металл-сегнетоэлектрик-полупроводник (МСЭП) $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$ с $x=0.4$ и $x=0.8$, осажденные методом ВЧ катодного распыления на кремниевую подложку р-типа ориентации (001) с различным чередованием слоев. Толщина пленок составляла величину ~ 150 нм. Изменение порядка следования пленок разных составов и, следовательно, с отличающимися температурами фазового перехода позволяло создавать структуры с различными значениями внутренних напряжений, влияющих на их электрофизические свойства [1].

Установлено, что до полевого воздействия МСЭП структуры имеют практически одинаковые значения емкости (~ 10 пФ), несмотря на различный порядок осаждения слоев, что доказывает присутствие в сегнетоэлектрике нескомпенсированного заряда, вызывающего появление обедненного слоя в кремнии р-типа. Показано, что диэлектрические потери в МСЭП структуре существенно возрастают только во время изменения её емкости, связанной с кинетикой образования зоны обеднения в поверхностном слое кремния. Определено влияние прикладываемого поляризующего напряжения на емкость структуры. В частности, исчезновение обедненного слоя в кремнии происходит при действии поля за время не менее 50 с.

Измерение вольт-фарадной характеристики (ВФХ) после поляризации (+10 В) показало, что она смещается в область положительных значений внешнего напряжения. Действие отрицательного напряжения не влияло на вид ВФХ при ее измерении после поляризации. Изучена релаксация емкости после подачи внешнего поляризующего напряжения при различном времени воздействия. Увеличение времени действия внешнего напряжения на МСЭП структуру приводит к увеличению времени релаксации ее емкости к исходному (малому значению емкости). Аппроксимировать релаксацию емкости хорошо удается только суммой двух экспонент, что позволяет предположить, что в механизме релаксации имеется два доминирующих механизма. Исследована корреляция ВФХ с изменением направления поляризации пленочной структуры под действием внешнего поля, определяемой по знаку пьезозаряда, измеряемого квазистатическим методом.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по теме № 01201354247 и по гранту РФФИ № 16-29-14013

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. *Интегрированные сегнетоэлектрики*. Москва, Энергоатомиздат, 2011. — 175 с.

Катионное упорядочение в перовскитах: что? где? когда?

Сахненко В.П., Тер-Оганесян Н.В.

*НИИ физики, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090, Россия,
(E-mail: nikita.teroganessian@gmail.com)*

Катионное упорядочение в сложных оксидах семейства перовскита существенным образом определяет их сегнетоэлектрические, магнитные и магнитоэлектрические свойства. Выявление этой связи требует решения двух задач:

1. найти температуры фазовых переходов упорядочения и определить кристаллографические параметры упорядочивающихся соединений;
2. установить зависимости макроскопических характеристик кристаллов от степени упорядочения s .

В докладе представлено последовательное решение этих задач для наиболее представительного класса перовскитов с упорядочивающейся B -подрешеткой – $AB'_{1/2}B''_{1/2}O_3$. Полученные общие результаты применены с привлечением кристаллохимических соображений, симметричного и термодинамического анализа при описании сегнетоэлектрических и магнитных состояний следующих соединений: $PbSc_{1/2}Ta_{1/2}O_3$, $PbIn_{1/2}Nb_{1/2}O_3$, $SrFe_{1/2}Mo_{1/2}O_3$ и других.

Кратко рассмотрено влияние внешнего давления на температуру катионного упорядочения и представлено универсальное P - V - T - s -уравнение состояния для окрестности фазового перехода упорядочения. В заключении обсуждаются переходы упорядочения в $A'_{1/2}A''_{1/2}B'_{1/2}B''_{1/2}O_3$ и более сложных соединениях.

Структурные фазовые переходы в кристаллах фторидов со структурой эльпасолита, содержащих ионы редкоземельных элементов – исследование методом комбинационного рассеяния света

**Втюрин А.Н.^{1,2}, Крылов А.С.¹, Крылова С.Н.¹,
Орешонков А.С.^{1,2}, Воронов В.Н.¹**

¹*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН
Красноярск, 660036, Россия (E-mail: vtyurin@iph.krasn.ru)*

²*Сибирский федеральный университет,
Красноярск, 660041, Россия*

Кристаллы, керамики, тонкие пленки и структуры оксидных соединений с перовскито-подобной структурой традиционно привлекают внимание исследователей всего мира и широко используются как функциональные материалы в многочисленных практических приложениях. Фторидные системы с аналогичной структурой изучены гораздо слабее, хотя известно, что них наблюдается не менее богатое разнообразие физических свойств, в частности – разнообразные последовательности фазовых переходов. Ранее нами методами колебательной спектроскопии был исследован ряд фторидов $A_2B^{(1)}B^{(2)}F_6$, в которых при понижении температуры наблюдалась последовательность фазовых переходов из кубической в тетрагональную и затем в моноклинную фазу [1,2]. Было установлено, что эти переходы сопровождаются конденсацией мягких мод, связанных с поворотами октаэдрических групп $B^{(2)}F_6$. В данной работе мы методом спектроскопии комбинационного рассеяния исследовали группу кристаллов, в которой положение иона $B^{(2)}$ занимает редкая земля (Ho или Dy), и наблюдается переход из кубической ($Fm\bar{3}m$, $Z = 4$) в моноклинную ($P12_1/n1$, $Z = 2$) фазу.

Спектры были получены на спектрометре T64000 Horiba – Jobin Yvon в диапазоне $10\text{--}1200\text{ см}^{-1}$, для возбуждения использовалась линия 514.5 нм Ar+ лазера Spectra-Physics Stabilite 2017 мощностью 15 мВт на образце.

Обнаруженные аномальные изменения спектров ниже точек фазовых переходов – в частности, появление ряда новых линий в низкочастотной области колебаний решетки и внутренних мод октаэдров $B^{(2)}F_6$, что, очевидно, связано с удвоением объема примитивной ячейки структуры, а также скачкообразные изменения частоты линий, свидетельствующие о первородном характере перехода. В отличие от предыдущих исследований, конденсации мягких фононных мод не наблюдалось. Отсутствуют также переходные аномалии ширины линий (за исключением монотонных изменений, связанных с ангармонизмом колебаний и температурным ходом заселенностей низколежащих колебательных состояний), что свидетельствует об отсутствии заметной роли процессов упорядочения в механизме фазового перехода. Предположительно, фазовый переход типа смещения из кубической в моноклинную фазу носит триггерный характер.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 16-02-00102.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krylov A. S., Vtyurin A. N., Oreshonkov A. S., Voronov V. N. and S. N. Krylova, J. Raman Spectr., **44**, 763 (2013).
2. Krylov A. S., Krylova S. N., Vtyurin A. N., Voronov V. N. and Oreshonkov A. S. Ferroelectrics, **416**, 95 (2011).

Барокалорический эффект при последовательных фазовых переходах вблизи тройной точки

Флёров И.Н., Горев М.В., Богданов Е.В.

¹Институт физики им. Л.В. Куриенского ФИЦ КНЦ СО РАН
Красноярск, 660036, Россия (E-mail: flerov@iph.krasn.ru)

Калорические эффекты в области фазовых переходов разной физической природы в твердых телах, в частности в ферроиках, в последние годы привлекают повышенное внимание. Это обстоятельство обусловлено, во-первых, возможностью получения в ходе исследований важной информации о непосредственной связи между такими фундаментальными представлениями как энтропия, температура, параметр порядка, структурный беспорядок, восприимчивость к внешним полям, и, во-вторых, актуальной необходимостью продвижения по пути поиска и дизайна эффективных твердотельных материалов-хладагентов для альтернативных рефрижераторных циклов, конкурентоспособных по отношению к традиционным газокomppressorным циклам [1].

Важными критериями поиска оптимальных хладагентов являются большая величина энтропии фазового перехода и высокая восприимчивость температуры перехода к внешним полям dT/dY . До сих пор, как правило, исследования электро-, магнито-, баро- и мультикалорических эффектов проводятся на материалах, испытывающих единичные фазовые переходы, характеризующиеся в случае мультиферроиков двумя или тремя параметрами порядка [2].

В настоящей работе представлены результаты исследования барокалорической эффективности ряда фтор-кислородных кристаллов, претерпевающих близкие по температуре последовательные фазовые переходы или при атмосферном давлении, или в результате расщепления фазовой границы под давлением.

Установлены характерные особенности поведения интенсивного и экстенсивного барокалорических параметров в окрестностях тройных точек, где в узких интервалах температуры и давления возможна реализация перехода от прямого к обратному калорическому эффекту, которые характеризуются соответственно адиабатным ростом/уменьшением температуры ΔT_{AD} и изотермическим уменьшением/ростом энтропии $\Delta S_{KЭ}$ при приложении давления (Рис. 1). Обнаруженное явление открывает новые перспективы использования твердотельных хладагентов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта N 17-42-240076 p_a.

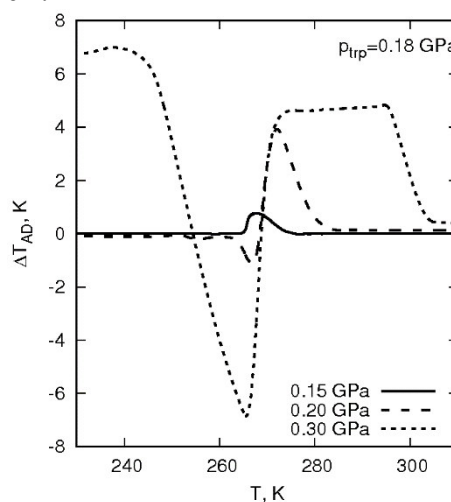


Рис. 1. Температурная зависимость интенсивного барокалорического эффекта ΔT_{AD} при давлениях ниже и выше тройной точки в $(NH_4)_3TiOF_5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флёров И.Н., Михалёва Е.А., Горев М.В., Карташев А.В. ФТТ **57**, 421 (2015).
2. Мoya X., Kar-Narayan S. and Mathur N.D. Nature Materials **13**, 439 (2014).

Диэлектрическая нелинейность и скорость ультразвука в области структурного фазового перехода в керамике $(K_{0.5}Na_{0.5})(Nb_{1-x}Ta_x)O_3$

Бурханов А.И.¹, Bormanis К.², Семибратов В.О.¹, Сопит А.В.¹,
Sternberg А.², Antonova М.², Kalvane А.²

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, 400031
(E-mail: burkhanov@inbox.ru)

²Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Riga, Kengaraga str.8, LV-1063, Latvia,
(E-mail: bormanis@cfi.lu.lv)

Среди различных систем сегнетопьезоактивных материалов, не содержащих свинца, керамика на основе ниобатов щелочных металлов привлекает к себе значительное внимание. В тоже время, несмотря на объем появляющихся в последнее время работ [1,2], вопрос о том, чтобы полностью заменить свинец содержащих материалов (например, цирконат титанат свинца), остается открытым.

Целью настоящей работы являлось изучение диэлектрического отклика сегнетокерамики $(K_{0.5}Na_{0.5})(Nb_{1-x}Ta_x)O_3+0,5mol\%MnO_2$ (KNN-xTa) в области температур структурного фазового перехода (T_{O-T}) из орторомбической в тетрагональную фазу и сопоставлению с поведением упругих свойств. Образцы сегнетокерамики KNN-xTa приготовлены по обычной керамической технологии. На большие плоскости образцов наносились серебряные электроды. Толщины образцов составляли от 0,5 мм до 1мм. Изучение диэлектрического отклика осуществлялось на основе анализа петель поляризации полученных на частотах 1 Гц -10 Гц с применением модифицированной схемы Сойера–Тауэра. Измерение скорости продольных звуковых волн осуществлялось с применением резонансного метода на образцах, приготовленных в виде палочек, длиной от 10 до 15 мм и толщиной 1,5- 2 мм.

В работе выявлены особенности электрофизических свойств керамики KNN-xTa, обусловленных существованием различного типа доменов в области размытого структурного фазового перехода.

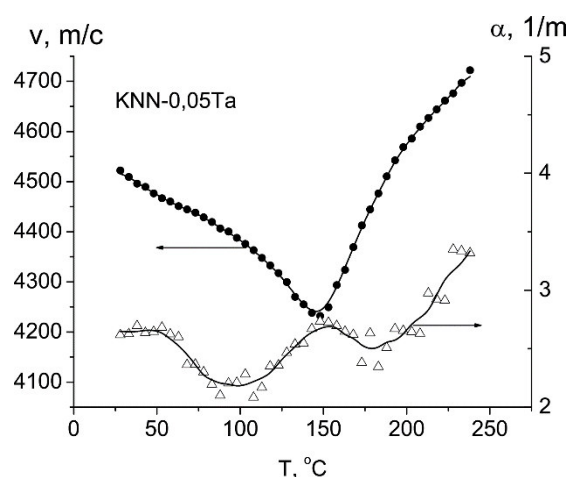
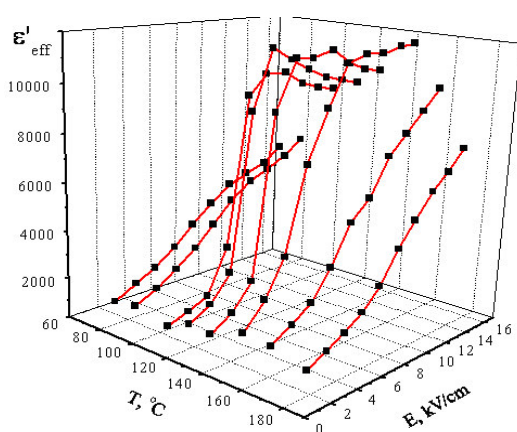


Рисунок 1. Поведение температурных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon'_{eff}(T,E)$ на частоте 1 Гц, скорости ультразвуковой волны (v) и коэффициента поглощения (α) в области T_{O-T} в образце с содержанием $x=0,05$ mol% тантала.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Rubio-Marcos, A. Del Campo, and J. F. Fernandez. J. Appl. Phys. **113**, 187215 (2013).
2. H. E. Mgbemere, R. Janssen, G. A. Schneider. J. Adv. Cer. **4**(4), 282-291 (2015).

Межмодовое взаимодействие в антисегнетоэлектриках и родственных материалах

Вахрушев С.Б.^{1,2}

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия
(E-mail: s.vakhrushev@mail.ioffe.ru)

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Россия

Проблема межмодового взаимодействия в сегнетоэлектрических материалах очень стара (обзор ранних публикаций в работе [1]). Наиболее ярко эффекты межмодового взаимодействия проявляются в неупругом рассеянии нейтронов и рентгеновского излучения. Уже в первом обзоре по исследованию структурных фазовых переходов методами рассеяния нейтронов демонстрируется влияние межмодового взаимодействия на форму фоновых резонансов [2]. При этом, безусловно, важность межмодового взаимодействия заключается не в искажении формы линии, а в вызываемых таким взаимодействием физических эффектах.

В настоящем докладе мы остановимся на ряде эффектов. Как показано в нашей работе [3], межмодовое взаимодействие может рассматриваться как основа антисегнетоэлектрического перехода в цирконате свинца. Влияние связи ТА и ТО мод становится еще более ярким при допировании цирконата свинца титаном [4], что будет подробнее показано в докладе Д. Андрониковой. В настоящем докладе мы остановимся на возможном объяснении формирования сложных модулированных структур в PZT с малым содержанием титана в результате межмодового взаимодействия.

Далее будет прослежено изменение картины критического рассеяния в PZT в области морфотропной фазовой границы, которое, по-видимому, может быть описано как результат смешивания двух сегнетоактивных мод колебаний, приводящее к тому, что обе катионные подрешетки становятся активными.

Отдельно, очень кратко, будет проанализирована возможность описания необычной асимметрии критического рассеяния в ряде перовскитов на основе межмодового взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. F. Scott, Rev. Mod. Phys., 46, 83 (1974).
2. G. Shirane, Rev. Mod. Phys., 46, 437 (1974).
3. A.K. Tagantsev, *et. al.*, Nature Communications 4, 2229 (2013).
4. D. A. Andronikova *et. al.* J. Phys.: Conf. Ser., 769, 12070 (2016).

Предпереходная динамика решетки в монокристалле цирконата-титаната свинца с малой концентрацией титана

**Андроникова Д. А.^{1,2}, Бронвальд Ю. А.^{1,2}, Леонтьев Н. Г.³,
Леонтьев И. Н.⁴, Бурковский Р. Г.¹, Филимонов А.В.¹, Вахрушев С. Б.^{1,2}**

¹Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Россия (E-mail: andronikova.daria@gmail.com)

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Россия

³Азово-Черноморский инженерный институт, Зерноград, 347740, Россия

⁴Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

Цирконат-титанат свинца (ЦТС), представляющий собой твердый раствор модельного антисегнетоэлектрика цирконата свинца и сегнетоэлектрика титаната свинца, – сегнетоэлектрический материал, нашедший распространение в различных областях электротехники [1]. ЦТС с малыми концентрациями титана (до 5%) испытывает два фазовых перехода: из параэлектрической фазы с симметрией кубического перовскита в промежуточную сегнетоэлектрическую и далее в орторомбическую антисегнетоэлектрическую фазу. Было показано, что структура промежуточной фазы гораздо сложнее, чем предполагалось ранее, и характеризуется наличием несоразмерной модуляции [2]. С целью определения микроскопических механизмов формирования промежуточной фазы нами было проведено исследование температурной зависимости динамики решетки в монокристаллах ЦТС $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ с концентрацией титана $x=0.007$ и 0.015 методом неупругого рассеяния синхротронного излучения. При проведении эксперимента основное внимание было уделено измерению спектров неупругого рассеяния в точках обратного пространства, расположенных в направлении $[-1 -1 0]$ в окрестности рефлекса (200). Было обнаружено, что в параэлектрической фазе в направлении $[100]$ наблюдается аномально низкая температурно-зависимая поперечно поляризованная акустическая ветвь, энергия которой понижается при приближении к температуре фазового перехода в промежуточную фазу. В окрестности центра зоны Бриллюэна наблюдается температурно-зависимый центральный пик, интенсивность которого критически возрастает при приближении к температуре фазового перехода. Данный центральный пик может быть связан с сегнетоэлектрической нестабильностью, проявляющей себя в аномалии диэлектрической проницаемости. На границе зоны Бриллюэна наблюдается иной, критически зависящий от температуры, центральный пик, положение данного центрального пика смещено относительно M-точки зоны Бриллюэна. Появление данного центрального пика может быть связано с образованием сверхструктурных рефлексов в окрестности M-точки зоны Бриллюэна, описываемых несоразмерным волновым вектором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Haertling, G. H. Journal of the American Ceramic Society **82**, 797 (1999).
2. Watanabe, S., Koyama, Y. (2002). Physical Review B, **66**(13), 134102.

Динамика решетки и упругие свойства нанотрубок дифенилаланина

**Зеленовский П.С.¹, Южаков В.В.¹, Давыдов А.О.¹, Васильев С.Г.¹,
Холкин А.Л.^{1,2}, Шур В. Я.¹**

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000, Россия (e-mail: zelenovskiy@urfu.ru)*

²*Department of Physics & CICECO – Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro, Aveiro, 3810-193 Portugal*

Микро- и нанотрубки дифенилаланина ($C_{18}H_{20}N_2O_3$, ДФА), обладают выраженными пьезоэлектрическими [1], пироэлектрическими [2] и сегнетоэлектрическими [3] свойствами, однако их механические свойства изучены недостаточно. Известно, что нанотрубки ДФА обладают высокой упругостью в поперечном направлении [4,5], тогда как расчеты из первых принципов предсказывают существенно меньшие значения модуля Юнга [6]. В данной работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования динамики кристаллической решетки и влияния капиллярной воды, содержащейся в наноканалах трубок ДФА, на их модуль Юнга.

В работе предложена одномерная модель нанотрубки ДФА, включающая систему колец, образованных мономерами ДФА, и подсистему молекул воды внутри них, связанные водородными связями. Решение уравнений движения такой системы в гармоническом приближении позволило установить связь между микроскопическими силовыми константами взаимодействия и макроскопическими упругими константами нанотрубки. Для численного определения упругих констант использовалась конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Центр масс низкочастотной области спектра ($50\text{-}350\text{ см}^{-1}$) ассоциировался с частотой взаимных колебаний кольца ДФА и воды внутри него [7]. Измерения поляризованных спектров КРС позволили определить набор силовых, а затем и упругих констант нанотрубок ДФА, которые затем были использованы для определения величины поперечного модуля Юнга (около 16 ГПа).

Прямое измерение поперечного модуля Юнга методом наноиндентирования выявило бимодальное распределение с характерными значениями 10 и 25 ГПа, которые были ассоциированы с пустыми и полностью заполненными трубками, соответственно [7]. Значение 16 ГПа, рассчитанное в данной работе с учетом только молекул воды, участвующих в образовании водородных связей с мономерами ДФА, попадает в середину бимодального распределения. После отжига нанотрубок при 80°C в течение 3 и 8 часов наблюдалось преобразование бимодального распределения модуля Юнга в одномодальное с преобладанием малых значений, что подтверждает наличие корреляции между величиной модулем Юнга и содержанием воды в наноканалах.

Исследование выполнено с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых (МК-2294.2017.2) и Правительства Российской Федерации (постановление 211, контракт 02.А03.21.0006).

ЛИТЕРАТУРА

1. Vasilev S., Zelenovskiy P., Vasileva D. et al., J. Phys. Chem. Solids **93**, 68 (2016).
2. Esin A., Baturin I., Nikitin T., Vasilev S. et al., Appl. Phys. Lett. **109**, 142902 (2016).
3. Gan Z., Wu X., Zhu X., and Shen J., Angew. Chem. Int. Ed. Engl. **52**, 2055 (2013).
4. Kol N., Adler-Abramovich L., Barlam D., et al., Nano Lett. **5**, 1343 (2005).
5. Niu L., Chen X., Allen S., and Tendler S.J.B., Langmuir **23**, 7443 (2007).
6. Azuri I., Adler-Abramovich L., et al., J. Am. Chem. Soc. **136**, 963 (2014).
7. Zelenovskiy P., Kornev I., et al., Phys. Chem. Chem. Phys. **18**, 29684 (2016).

Особенности динамики решетки в двухслойных гетероструктурах на основе титаната бария-стронция

**Лянгузов Н.В.^{1,2}, Анохин А.С.¹, Разумная А.Г.², Головки Ю.И.¹,
Мухортов В.М.¹**

¹*Южный научный центр РАН Ростов-на-Дону, 344006, Россия
(E-mail: n.lianguzov@mail.ru)*

²*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090, Россия*

В настоящее время проводятся активные исследования сегнетоэлектрических гетероструктур, состоящих из слоев различного состава, с целью улучшения их свойств за счет деформации элементарной ячейки в тонких слоях. Управление деформацией элементарной ячейки в гетероструктурах осуществляется варьированием состава слоев, подбором материала подложки или буферного слоя.

Влияние последовательности нанесения слоев $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ с $x=0.8$ и $x=0.4$ (BST08 и BST04, соответственно) на деформацию элементарной ячейки и диэлектрические свойства в двухслойных гетероструктурах BST08/BST04 и BST04/BST08 было изучено методами рентгеновской дифракции и комбинационного рассеяния света. Симметричные двухслойные гетероструктуры BST08/BST04 и BST04/BST08 были выращены методом ВЧ катодного распыления на кубической подложке (001)MgO с толщинами слоев BST08 и BST04 равными 45, 75 и 300 нм.

Исследования поляризованных спектров КРС гетероструктур показали, что в зависимости от последовательности напыления слоев BST08 и BST04 наблюдаются особенности в поведении низкочастотной поперечной мягкой моды, связанной с величиной статической диэлектрической проницаемости. Отметим, что в спектрах КРС гетероструктур BST08/BST04/MgO и BST04/BST08/MgO с толщиной слоев 45 нм наблюдается существенное различие (на величину ~ 15 см⁻¹) частоты мягкой моды E-типа (104 и 89 см⁻¹, соответственно). При увеличении толщины слоев BST08 и BST04 до 75 нм, сдвиг частоты мягкой моды составляет ~ 10 см⁻¹ в спектрах гетероструктур BST08/BST04/MgO (100 см⁻¹) и BST04/BST08/MgO (90 см⁻¹). В спектрах гетероструктур BST08/BST04/MgO и BST04/BST08/MgO с толщиной слоев 300 нм частота мягкой моды составляет 102 и 97 см⁻¹, соответственно. Таким образом, влияние последовательности нанесения слоев на деформацию элементарной ячейки уменьшается с увеличением толщины слоев.

Повышение частоты E(TO) мягкой моды в гетероструктурах BST08/BST04/MgO свидетельствует о наличии сжимающих напряжений в слоях BST04 и BST08, образующих эти гетероструктуры. Это хорошо согласуется с результатами рентгенодифракционных исследований, в которых было установлено, что степень тетрагонального искажения увеличивается в гетероструктурах, где нижним слоем является слой BST04. Следовательно, значения внутренних механических напряжений и, как следствие, значения вынужденных деформаций существенно зависят от последовательности напыления слоев. Меняя порядок следования слоев, можно влиять на величину диэлектрической проницаемости, спонтанной поляризации, существенно изменять температуру Кюри.

Критическое рассеяние и несоизмеримые фазовые переходы в антисегнетоэлектриках PbZrO_3 и PbHfO_3 под давлением

Бурковский Р.Г.^{1,2}, Бронвальд Ю.А.^{1,2}, Андроникова Д.А.^{1,2}, Князева М.А.^{1,2}, Таганцев А.К.², Филимонов А.В.¹, Вахрушев С.Б.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Россия (E-mail: roman.burkovsky@gmail.com)

²Физико-технический институт им А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия

Критическая динамика и фазовые переходы в перовскитоподобных кристаллах изучается более пятидесяти лет. Значительный пласт информации о мягких модах и критическом диффузном рассеянии получен к настоящему времени при помощи методов рассеяния нейтронов. Группа перовскитов, не подвергшихся до недавнего времени такого рода исследованиям – свинец-содержащие антисегнетоэлектрики. Недавно были проведены первые эксперименты по неупругому и диффузному рассеянию синхротронного излучения в PbZrO_3 [1] и PbHfO_3 [2]. Критический рост обобщенной восприимчивости наблюдается для них для широкого интервала волновых векторов вдоль направления $(\xi, \xi, 0)$. Выдвинут ряд моделей, описывающих наблюдаемую температурную эволюцию восприимчивости, сделаны попытки свести сложную картину критической динамики к единому критическому параметру.

В докладе освещены противоречия, возникающие при таких попытках описания критических процессов и представлены результаты прямой экспериментальной проверки соответствующих гипотез за счет варьирования сразу двух термодинамических параметров – температуры и давления – с использованием нагреваемых алмазных наковален (Diamond Anvil Cells). Анализ структуры и обобщенной восприимчивости осуществлен методами Брэгговского, диффузного и неупругого рассеяния синхротронного излучения на линиях источника ESRF (г. Гренобль, Франция). Показано, что при повышенных давлениях в антисегнетоэлектрике PbZrO_3 реализуется последовательность ранее не наблюдававшихся фазовых переходов, включающая индуцированный несоизмеримой мягкой модой переход в несоизмеримо модулированную структуру, и переход, связанный с фиксацией фазы модуляции. Обнаружена новая, немодулированная высокотемпературная фаза, обладающая симметрией ниже кубической, которая является мостом между родительской кубической фазой и низкосимметричными модулированными структурами. Наличие фазы такого типа при высоких давлениях является общим для антисегнетоэлектриков PbZrO_3 и PbHfO_3 . Экспериментальные результаты указывают на необходимость пересмотра предложенных ранее феноменологических моделей фазовых переходов в цирконате свинца, которые основаны на выделении единого критического параметра, а также на необходимость усложнения предложенных первопринципных схем для учета новых фаз [3]. Работа поддержана правительством Санкт-Петербурга, грантом президента РФ МК-5685.2016.2 и РФФИ в рамках проектов 16-02-01162, 16-52-48016.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tagantsev A. K. et al., Nature Communications **4**, 3229 (2013).
2. Burkovsky R. G. et al., Journal of Physics: Condensed Matter **27**, 335901 (2015).
3. Burkovsky R. G. et al., Scientific Reports **7**, 41512 (2017).

Эффект взаимодействия мод в спектрах неупругого рассеяния света в $\text{Na}_{1/2}\text{V}_{1/2}\text{TiO}_3$

Дерец Н.К.^{1,2}, Федосеев А.И.¹, Сырников П.П.¹, Seiji Kojima³,
Лушников С.Г.^{1,2}

¹Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН Санкт-Петербург, 194021, Россия (E-mail: sergey.lushnikov@mail.ioffe.ru)

²СПбГУ, Санкт-Петербург, 199000, Россия

³Institute of Materials Science, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

Натрий-висмутовый титанат $\text{Na}_{1/2}\text{V}_{1/2}\text{TiO}_3$ (NBT), принадлежит к семейству релаксорных сегнетоэлектриков со структурой перовскита (общая формула ABO_3). Структура и динамика решетки NBT является предметом горячих дискуссий на протяжении более чем 60 лет. Достоверно установлено изменение от кубической до тетрагональной симметрии при сегнетоэластическом фазовом переходе в окрестности 810 К. Поведение диэлектрических, акустических и других свойств NBT при сегнетоэластическом, релаксорном, сегнетоэлектрическом фазовых переходах демонстрирует ярко выраженные аномалии, природа которых до сих пор не установлена. Особый интерес вызывает поведение длинноволновых акустических фононов в окрестности фазовых превращений в NBT. Это стимулировало нас на проведение экспериментов по мандельштам-бриллюэновскому рассеянию (МБР) света в широком температурном интервале.

В настоящей работе приведены результаты исследований гиперзвуковых акустических фононов в кристалле NBT с $q_{\text{ph}}\parallel[100]$ в температурном интервале 820 – 300 К. Измерения проводились в 90-градусной геометрии рассеяния с помощью многопроходного интерферометра Фабри-Перо. В качестве источника света служил твердотельный лазер с длиной волны 532 нм. Дополнительно к фононным линиям (ТА и LA) в экспериментальных спектрах наблюдалось квазиупругое рассеяние света. Особое внимание привлекло искажение (асимметрия) ТА фононных линий, возникающая в окрестности возникновения релаксорного состояния. Эта асимметрия мод характерна для резонансных явлений, связанных с эффектом Фано. Полученные экспериментальные спектры рассеяния света в NBT хорошо описываются в рамках модели Фано. В результате обработки были получены температурные зависимости полуширины и восприимчивости квазиупругого рассеяния света, частоты, полуширины и восприимчивости поперечного и продольного акустических фононов и константы связи. Резонанс Фано в диэлектрических кристаллах предполагает наличие связи между поперечным акустическим (ТА) и оптическим (ТО) фононами. Наши результаты хорошо согласуются с литературными данными по экспериментам по неупругому рассеянию нейтронов в NBT. На основании корреляции температурных зависимостей полуширины квазиупругого рассеяния света и константы связи мы предполагаем, что релаксационная мода, проявляющаяся в наших экспериментах как квазиупругое рассеяние света участвует во взаимодействии ТА и ТО мод.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 14-12-00257.

Влияние ориентации подложки MgO на динамику решетки пленок титаната бария-стронция

Анохин А.С.¹, Разумная А.Г.², Головки Ю.И.¹, Мухортов В.М.¹

¹Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, 344006, Россия
(E-mail: anokhin.andrey@gmail.com)

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090, Россия

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света выполнено сравнительное исследование динамики решетки при фазовых переходах в эпитаксиальных пленках $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ (BST), выращенных на различных срезах подложки MgO. Гетероэпитаксиальные пленки BST, с толщинами ~ 200 nm, были синтезированы методом высокочастотного катодного распыления керамической мишени на монокристаллических подложках (001)MgO и (111) MgO.

Установлено, что в зависимости от ориентации подложки MgO в пленках реализуются разные последовательности фазовых переходов. В пленке BST/(001)MgO двумерные сжимающие напряжения, обусловленные подложкой, повышают температуру фазового перехода (по сравнению с керамикой аналогичного состава) из параэлектрической фазы в сегнетоэлектрическую тетрагональную с-доменную фазу до 540 K, а ниже 140 K в этой пленке происходит переход в моноклинную фазу [1]. Использование подложки (111)MgO позволило нам получить пленку BST с ромбоэдрической симметрией при комнатной температуре и исследовать прямой переход из ромбоэдрической сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую фазу вблизи комнатной температуры [2].

Особенности поведения мягкой моды (Рис.1) указывает на различных характер фазовых переходов в пленках BST в зависимости от ориентации подложки MgO [3]. В пленке BST/(001)MgO ужесточение мягкой моды свидетельствует о том, что переход из тетрагональной сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую имеет черты как фазового перехода типа смещение, так и перехода типа порядок-беспорядок. При приближении к температуре сегнетоэлектрического перехода мягкая мода в пленке BST/(111)MgO смягчается, следуя закону Кокрена, что указывает на фазовый переход типа смещения. Напротив, повышение частоты мягкой моды в пленке BST/(001)MgO при повышении температуры характерно для фазовых переходов типа порядок-беспорядок.

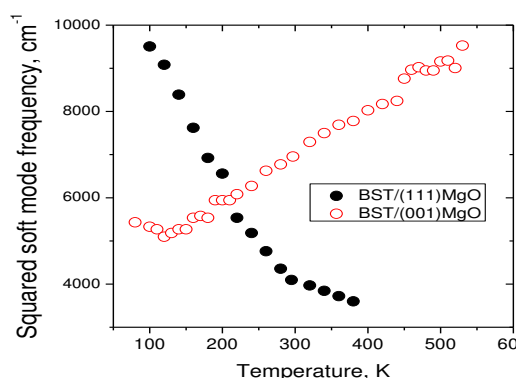


Рис. 1. Зависимость квадрата частоты мягкой моды от температуры

ЛИТЕРАТУРА

1. P.-E. Janolin, A. S. Anokhin, Z. Gui et al., J. Phys.: Condens. Matter, **26**, 292201 (2014).
2. A. S. Anokhin, Y. I. Yuzyuk, N. V. Lyanguzov et al., EPL **112**, 47001 (2015).
3. А. С. Анохин, А. Г. Разумная, Ю. И. Юзюк и др., ФТТ **58**, 1956 (2016).

Фазовая диаграмма кристаллов $(\text{NH}_4)_2\text{W}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_2\text{F}_4$ — исследование методом рассеяния нейтронов

**Богданов Е.В.^{1,2}, Смирнов Л.С.³, Натканец И.⁴, Флёрв И.Н.¹,
Лапташ Н.М.⁵**

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КИЦ СО РАН, Красноярск, 660036
Россия (E-mail: evbogdanov@iph.krasn.ru)

²Институт инженерных систем и энергетики, ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ,
Красноярск, 660049, Россия

³Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова, НИИ
КИ, Москва, 117218, Россия

⁴Faculty of Physics, Adam Mickiewicz University, Umultowska 85, Poznań, 61-614, Poland

⁵Институт Химии ДВО РАН, Владивосток, 690013, Россия

Фтор-кислородные кристаллы $(\text{NH}_4)_2\text{MeO}_2\text{F}_4$ (Me: W, Mo) характеризуются ромбической симметрией (пр. гр. *Smc*, $Z = 4$) и при понижении температуры испытывают два фазовых перехода $G_0 \rightarrow G_1 \rightarrow G_2$ [1]. Замещение центрального атома Mo \rightarrow W приводит к резкому возрастанию температуры потери устойчивости фазы G_0 ($T_1 = 200 \text{ K} \rightarrow 270 \text{ K}$) и к изменению симметрии и природы фазы G_1 (пр. гр. *P-1* – (сегнетоэластическая) \rightarrow пр. гр. *Pnma* – (антисегнетоэлектрическая)). В твердых растворах $(\text{NH}_4)_2\text{W}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_2\text{F}_4$ энергетически более выгодной остается фаза G_1 – пр.гр. *Pnma*, которая реализуется в широком интервале концентраций Mo ($x > 0.3$). А в кристаллах с $x \approx 0.3$ возможно сосуществование обеих искаженных фаз.

Методом неупругого некогерентного рассеяния нейтронов проведены исследования динамики исходной и искаженных фаз кристаллов $(\text{NH}_4)_2\text{W}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_2\text{F}_4$, $x = 0.0, 0.3, 1.0$. Измерения выполнены в широком интервале температур (20 – 300 К) на спектрометре обратной геометрии *HEPA*, установленном на импульсном высоко-поточном реакторе *ИБР-2М* Объединенного Института Ядерных Исследований [2]. На Рис. 1. приведены спектры интенсивности рассеяния $I(\lambda)$ в зависимости от длин волн нейтронного излучения. Установлено, что вклад квазиупругого некогерентного рассеяния нейтронов (*KPH*) в интенсивность неупругого некогерентного рассеяния (*NPH*) ($\lambda_0 \approx 4.191 \text{ \AA}$) для кристалла $(\text{NH}_4)_2\text{W}_{1.7}\text{Mo}_{0.3}\text{O}_2\text{F}_4$ значительно превосходит соответствующие вклады от исходных соединений. В области рассеяния нейтронов ($\lambda \sim 1.0 - 1.5 \text{ \AA}$) обнаружены две либрационные моды и определены энергии колебаний двух кристаллографически независимых аммонийных групп. Выполнено обсуждение наблюдаемого значительного вклада *KPH* в интенсивность *NPH* $(\text{NH}_4)_2\text{W}_{1.7}\text{Mo}_{0.3}\text{O}_2\text{F}_4$ по сравнению с аналогичным вкладом от исходных соединений и возможности влияния этого эффекта на природу и характеристики фазовых переходов.

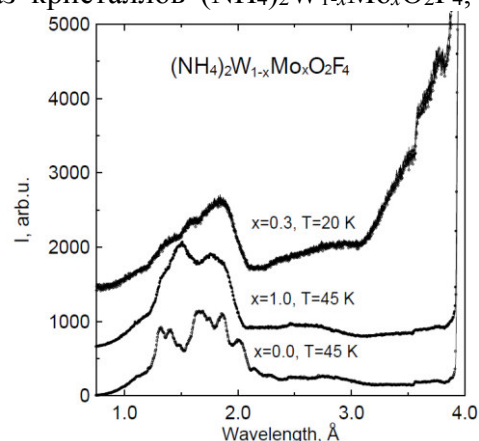


Рис. 1. Спектры $I(\lambda)$ кристаллов $(\text{NH}_4)_2\text{W}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_2\text{F}_4$, $x = 0.0, 0.3, 1.0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bogdanov E.V, Pogoreltsev E. I., Mel'nikova S. V. et al. PSS **55**, 409-418, (2013).
2. Smirnov L.S., Natkaniec I., Sashin I.L. ea. Preprint ИТЭР **3-16** (2016), Moscow, Russia.

Фотостимулированные явления в релаксорах

Мамин Р. Ф.

¹*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия (E-mail: tamin@kfti.knc.ru)*

Сегнетоэлектрики с размытыми фазовыми переходами, которые принято называть релаксорами, привлекают неизменный интерес, так как в них сочетается интригующая физика наблюдаемых явлений с разнообразием практического применения [1, 2]. Определенные успехи получены при описании поведения релаксоров на основе модели, связывающей релаксорное поведение с динамикой образования поляронных состояний в результате локализации зарядов на дефектах [3-5]. Процессы локализации носителей заряда на примесных центрах играют важная роль в настоящей теории и позволяют описать как размытие фазового перехода, так и возникновение дисперсионного поведения [3, 5]. Свойства релаксоров можно значительно изменять, добавляя малое количество примеси, которая влияют на зарядовое состояние составов. В связи с этим возникла идея исследования фотопроводящих свойств и фотостимулированных явлений в релаксорах в широком температурном интервале в связи с тем, что свет существенно изменяет зарядовое состояние дефектов. Нами проведены исследования спектральной зависимости фотопроводимости, фотостимулированных токов, возникающих в отсутствие внешнего напряжения, люминесценции и температурного поведения фотостимулированного изменения диэлектрических свойств в релаксорах PMN, PLZT и PMN-PT. Характерный пик в спектрах фотопроводимости соответствует плотности состояний дефектных уровней, расположенных ниже дна зоны проводимости. Значение энергии активации и энергетический интервал между областью локализации носителей заряда на дефектах и зоной проводимости хорошо между собой согласуются [6]. На основе полученных данных выявлена структура плотности состояний дефектных уровней и обсуждена возможность участия этих состояний в формировании размытого фазового перехода в релаксорах. Исследована динамика фотовозбужденных состояний и населенности дефектных уровней в магнониобате свинца (PMN) после облучения фемтосекундными лазерными импульсами. Регистрируемый сигнал пропорционален изменению показателя преломления и концентрации «холодных» свободных носителей. Определено характерное время нарастания этой компоненты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смоленский Г.А., Исупов В.А., Аграновская А.И., Попов С.Н. ФТТ, 2, № 10, 2906 (1960).
2. Cross L.E. Ferroelectrics, 76, 241 (1987).
3. Мамин Р.Ф. Известия РАН, сер. физическая **71**, вып. 10, 1398 (2007).
4. Мамин Р.Ф. ФТТ, **43**, № 7, 1262 (2001).
5. Мамин Р.Ф., Блинц Р. ФТТ, **45**, № 5, 897 (2003).
6. Мамин Р.Ф., Мигачев С.А., Садыков М.Ф., Юсупов Р.В. ФТТ **57**, в.3, 519(2015).

TlInS₂ легированный V, Cr, Mn — новый сегнетоэлектрик релаксор

**Сардарлы Р.М., Абдуллаев А.П., Салманов Ф.Т., Алиева Н.А.,
Оруджева А.А., Мамедова Г.Э.**

*Институт радиационных проблем национальной академии наук Азербайджана,
370143 – Баку, Азербайджанская Республика, пр. Г. Джавида 31а. (E-mail:
sardarli@yahoo.com)*

Изучены диэлектрические, поляризационные и пьезоэлектрические свойства кристаллов TlInS₂ легированных 0.1 мол.% Cr и Mn. Показано, что эти материалы могут быть отнесены к классу сегнетоэлектриков-релаксоров. Установлена температурная область существования устойчивого релаксорного (нанодоменного) состояния и температура перехода в сегнетоэлектрическое (макродоменное) состояние, сопровождаемое аномалией в температурной зависимости пиротока.

В последние годы интенсивно исследуются сегнетоэлектрики с размытыми фазовыми переходами, называемые также релаксорами. Характерными особенностями этого класса соединений являются: сильное размытие максимума на температурной зависимости диэлектрической проницаемости $\epsilon(T)$; сдвиг максимума $\epsilon(T)$ в сторону высоких температур с увеличением частоты измерительного поля; наличие узкой вытянутой петли сегнетоэлектрического гистерезиса в ограниченной температурной области; наличие скачка в температурной зависимости пиротока, указывающего на температуру перехода из релаксорного состояния в сегнетоэлектрическое; подчинение зависимости $\epsilon^{-1}(T)$ выше T_m (температура максимума $\epsilon(T)$) не закону Кюри-Вейса, а закону $(\epsilon)^{-1/2} = A + B(T - T_0)$; частотная дисперсия температуры максимума $\epsilon(T)$, описываемая соотношением Фогеля-Фулчера

Легирование кристаллов TlInS₂ ванадием, хромом и марганцем приводит к появлению температурной области с устойчивым релаксорным состоянием. При температурах 168K для монокристаллов TlInS₂<Cr>, при 174K – для TlInS₂<Mn> и при TlInS₂<V> при 180K, происходят фазовые переходы из нанодоменного-релаксорного состояния в макродоменное сегнетоэлектрическое состояние. Этим температурам соответствуют скачки в зависимости $\gamma(T)$, которые совпадают также с температурой замораживания нанополярных доменов, соответствующей температуре Фогеля-Фулчера.

О теплоемкости релаксоров со структурой перовскита

Шнайдштейн И.В., Грабовский С.В.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Москва, 119991, Россия (E-mail: shn aidshtein@physics.msu.ru)*

Сегнетоэлектрики-релаксоры находят все более широкие области применения прежде всего благодаря своим уникальным пьезоэлектрическим свойствам. Для целого ряда приложений важны также электрокалорические свойства этих материалов, при изучении которых необходимы данные о теплоемкости. Тепловые свойства классического релаксора — PMN исследовались в ряде работ, начиная с [1], где методом дифференциальной сканирующей калориметрии была обнаружена размытая аномалия теплоемкости в области частотно-зависимого пика диэлектрической проницаемости (250-280K). Однако в следующей работе [2], выполненной методом адиабатической калориметрии, эти результаты не подтвердились: была получена монотонная температурная зависимость теплоемкости, близкая к линейной при низких температурах. Отличалось систематическое превышение экспериментальной кривой над фоновой теплоемкостью, полученной комбинацией дебаевской и эйнштейновских функций. Эти результаты были подтверждены в более поздних работах [3-5], где теплоемкость измерялась методами адиабатической и релаксационной калориметрии.

При экспериментальном изучении сегнетоэлектрика-релаксора PIN-PMN-PT ($\text{Pb}(\text{In}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$) мы учли отмеченную авторами [2-5] проблему несоответствия фоновой теплоемкости релаксоров классической модели, основанной на комбинации дебаевской и эйнштейновских функций, особенно проявляющееся при температурах меньше 30 К. Поэтому наше основное внимание было направлено на исследование теплоемкости этого состава при достаточно высоких температурах, где отклонение фоновой теплоемкости от классических интерполяционных функций незначительно.

Результатом явилось получение зависимостей избыточной теплоемкости для кристаллов PMN и PIN-PMN-PT в рамках одного метода, позволяющего указать границы применимости дебаевского приближения при анализе теплоемкости сегнетоэлектриков-релаксоров со структурой перовскита. В работе обсуждается связь полученных зависимостей с данными по инфракрасным спектрам указанных кристаллов. Также обсуждается возможность применимости разработанного метода к классическим сегнетоэлектрикам со структурой перовскита.

Авторы благодарят профессора Б.А. Струкова за поддержку и внимание проявленное на всех этапах выполнения настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Fouskova, V. Kohl, N.N. Krasnik, J.E. Reylnikova, *Ferroelectrics*, **181**, 119 (1981)
2. Б.А. Струков, Е.Л. Соркин, В.М. Ризак и др. *ФТТ*, **31**, 121 (1989)
3. Y. Moriya, H. Kawaji, T. Tojo, T. Atake, *PRL*, **90**, 205901 (2003)
4. S. Gvasaliya, S. Lushnikov, Y.Moriya etc., *J.Phys.: Condens.Matter* **16** 8981 (2004)
5. М.В. Горев, И.Н. Флеров, В.С. Бондарев, Ф. Сью, *ЖЭТФ*, **123**, 599 (2003)

Кинетика зарождения термодинамически упорядоченных сегнетоэлектрических фаз в ряде монокристаллических твердых растворов

Камзина Л.С., Кулакова Л.А.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург 194021, Россия (E-mail: kamzin@mail.ioffe.ru)

Исследована индуцированная электрическим полем динамика фазового перехода из стеклоподобного релаксорного состояния в сегнетоэлектрическую фазу в двойных $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PMN- x PT) ($x=29,33$ и 35%) и тройных $\text{PbIn}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3-\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PIN-PMN- x PT) ($x=25$ и 32%) монокристаллических системах в различных геометриях приложения внешнего электрического поля $E // [001]$ и $E // [011]$.

Впервые проведены одновременные измерения оптического пропускания, скорости и затухания звука. Обнаружено, что изменение упругих свойств наступает позже, чем изменение оптического пропускания, что связано с разными размерами полярных областей и времен релаксации, на которые реагируют свет и звук. Обнаружено, что в области фазового перехода в узком интервале полей при любом способе приложения электрического поля резко меняются оптическое пропускание, скорость звука и затухание. Показано, что образованию сегнетоэлектрических фаз и быстрому установлению макроскопической поляризации предшествует некоторое время задержки, зависящее от величины электрического поля и температуры.

Обнаружено, что при комнатной температуре во всех двойных системах в исследуемом интервале времен (~ 3000 s) и электрических полей (~ 1 kV/cm) термодинамически устойчивой является моноклинная фаза. В кристалле PMN-35PT при температурах вблизи морфотропного фазового перехода впервые удалось наблюдать как моноклинная фаза, возникшая в электрическом поле ~ 1 kV/cm, трансформируется спустя незначительный промежуток времени ~ 100 s в другую сегнетоэлектрическую тетрагональную фазу, которая остается стабильной в течение длительного времени и после снятия электрического поля (рис.1).

На примере кристаллов PIN-PMN- x PT установлено, что в интервале полей $0-2$ kV/cm при $E // [001]$ в результате фазового перехода происходит только частичная поляризация образца, в то время как в кристалле PIN-PMN-32PT при $E // [011]$ в том же интервале полей фазовый переход завершается практически полной поляризацией образца.

Таким образом, совместное наблюдение изменения во времени оптических и акустических свойств позволяет проследить особенности динамики формирования полярных областей в процессе фазового перехода из стеклоподобной фазы в сегнетоэлектрическую.

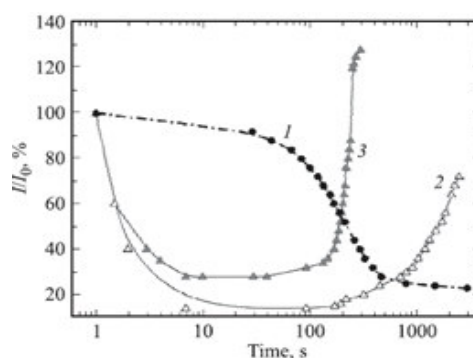


Рис. 1. Изменение оптического пропускания со временем (I/I_0) при разных температурах в фиксированном электрическом поле 1.33 kV/cm в кристаллах PMN-35PT 1 — 295K, 2 — 346K, 3 — 363K.

Особенности стеклодипольного состояния сегнетокерамики на основе ЦТС под воздействием температуры и электрического поля

Константинов Г.М., Константинова Я.Б., Швецова Н.А., Рыбьянец А.Н.

*Южный федеральный университет Россия, 344090,
г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194 (E-mail: georgy.konstantinov@yandex.ru)*

Ранее при исследовании сегнетокерамических твердых растворов на основе цирконата-титаната свинца в материале ПКР-7М нами было установлено наличие стеклодипольного состояния [1]. Это состояние характеризуется присутствием псевдокубической непоэлектрической кристаллической фазы наряду с сегнетоэлектрическими ромбоэдрической и тетрагональной фазами, сосуществующими в области морфотропного перехода. Указанная сегнетокерамика обладает аномально сильным размытием сегнетоэлектрического фазового перехода в результате керамические образцы удается поляризовать при температуре более чем на 40⁰С превышающих температуру максимума диэлектрической проницаемости.

В настоящей работе проведены детальные исследования влияния температуры и электрического поля на структурные параметры сегнетокерамики ПКР-7М. Исследование воздействия этих параметров на керамические образцы проводилось непосредственно на дифрактометре при помощи специальных приставок.

В результате исследований установлено, что кубическая непоэлектрическая фаза присутствует в керамических образцах материала ПКР-7М в широком температурном интервале. Ее наличие регистрируется при температурах более чем на 150⁰ выше температуры максимума диэлектрической проницаемости. При этом с ростом температуры ее содержание постепенно уменьшается, и она плавно переходит в кубическую параэлектрическую фазу. В интервале сосуществования кубической и псевдокубической фаз коэффициент температурного расширения равен нулю. Обычное температурное расширение керамических образцов начинает наблюдаться только в области существования кубической параэлектрической фазы.

При воздействии электрических полей обнаружено, что с ростом напряженности электрического поля псевдокубическая фаза переходит в сегнетоэлектрическую тетрагональную фазу, причем вектор спонтанной поляризации этой фазы ориентируется вдоль вектора напряженности электрического поля.

Полученные экспериментальные закономерности обсуждаются с позиции наличия стекло-дипольного состояния в исследованном материале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Konstantinov G.M. et.al. *In: Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics. 175, Chapter 16, 229 (2016).*

Дизайн и пьезоэлектрические свойства многокомпонентных твердых растворов с участием сегнетоэлектриков-релаксоров

Таланов М.В., Шилкина Л.А., Резниченко Л.А.

*Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики,
г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: tmikle-man@mail.ru)*

Исследование твердых растворов (ТР) вблизи морфотропных фазовых границ (МФГ), отделяющих друг от друга различные кристаллические фазы в системах с неизоструктурными компонентами, является неотъемлемой частью поиска и создания новых высокоэффективных пьезоэлектрических материалов. С точки зрения применений в устройствах пьезотехники, требующих высоких значений индуцированных электрическим полем деформаций, наиболее перспективными представляются ТР сегнетоэлектриков-релаксоров (СЭР) $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ и $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ с сегнетоэлектриком PbTiO_3 (x). Монокристаллы этих ТР вблизи МФГ, разделяющей тетрагональную и ромбоэдрическую области x - T фазовых диаграмм, демонстрируют высокие значения пьезоэлектрических откликов ($d_{33} > 2500$ пКл/Н) и коэффициента электромеханической связи ($k_{33} > 0.90$) [1], что делает возможным их использование в широком диапазоне устройств [2]. Однако в большинстве известных бинарных систем с участием СЭР, МФГ проявляются в весьма узком диапазоне концентраций, что усложняет их исследование и выбор составов ТР с необходимым набором параметров. Одним из решений этой проблемы является дизайн многокомпонентных систем ТР, что существенно повышает возможности выбора функциональных материалов за счет увеличения мерности МФГ и расширения диапазона ее существования [3]. Целью работы стало выявление общих закономерностей проявления пьезоэлектрических откликов многокомпонентных ТР с участием СЭР вблизи МФГ для создания функциональных материалов.

В качестве объекта исследования нами были выбраны ТР многокомпонентной системы $\text{Pb}_{(1-z)}\text{Ba}_z(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_m(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_n(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_n\text{Ti}_x\text{O}_3$ ($x = 0.25 - 0.4$, $y = 0.1130 - 0.0842$, $m = 0.4844 - 0.1298$, $n = 0.1266 - 0.4726$, $z = 0 - 0.15$). На основании результатов рентгенодифракционных и диэлектрических исследований были построены x - T фазовые диаграммы изучаемых ТР. В работе обсуждаются особенности проявления пьезоэлектрических откликов вблизи МФГ и границ существования различных диэлектрических состояний (эргодический и нэргодический релаксор, сегнетоэлектрик). Дизайн многокомпонентной системы, позволил получить керамические материалы с повышенными значениями пьезоэлектрических откликов ($d_{33} = 621$ пКл/Н).

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и РФФИ в рамках научных проектов 16-32-00144 «мол_а» и 16-32-60025 «мол_а_дк» с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Park S.E., Shrout T.R. J. Appl. Phys. **82**, 1804 (1997).
2. Zhang S., Li F. J. Appl. Phys. **111**, 031301 (2012).
3. Данцигер А.Я., Разумовская О.Н., Резниченко Л.А. и др. *Многокомпонентные системы сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна пьезоэлектрических материалов*. Ростов-на-Дону: «Новая книга». **1,2**, 773 с. (2002).

Особенности поведения теплового расширения твердых растворов $(1-x)\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$

Горев М.В.¹, Флёров И.Н.¹, Bormanis К.², Kalvane А.²

¹Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия (E-mail: gorev@iph.krasn.ru)

²Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Riga, LV-1063 Latvia

Одними из ярких представителей смешанных сегнеторелаксоров, обладающих большой диэлектрической проницаемостью, высокими пьезоэлектрическими и электрострикционными коэффициентами и перспективных для применений, являются твердые растворы PNN-PT $[(1-x)\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3]$. PNN относится к семейству оксидных соединений с релаксорным поведением [1] и является мультиферроиком: размытый фазовый переход в сегнетоэлектрическую фазу с частотно-зависимым пиком диэлектрической проницаемости ϵ и антиферромагнитный переход реализуются соответственно при $T_m \approx 153$ К и $T_N \approx 5$ К. Титанат свинца является хорошо исследованным типичным сегнетоэлектриком с $T_c \approx 750$ К, в котором при переходе из кубической в тетрагональную фазу наблюдается острый частотно-независимый пик ϵ . На фазовой диаграмме T-x системы PNN-PT существует морфотропная область вблизи $x \sim 0.35$, где могут реализоваться несколько фаз - кубическая, псевдокубическая, тетрагональная и ромбоэдрическая [2].

В работе представлены результаты исследований теплового расширения керамических образцов $(1-x)\text{PNN}-x\text{PT}$ ($x = 0 - 0.8$) в интервале температур от 100 до 750 К. Обнаружено, что аномалия коэффициента объемного теплового расширения $\beta(T)$ при переходе из кубической фазы в тетрагональную, характерная для чистого PT, остается достаточно острой, но уменьшается по амплитуде по мере уменьшения x вплоть до ~ 0.5 . При меньших концентрациях PT, то есть, после морфотропного фазового перехода, аномалия размывается и становится характерной для сегнетоэлектриков-релаксоров (рис. 1). Проведено сравнение полученных результатов с данными исследований диэлектрических свойств, теплоемкости [3] и концентрационной фазовой диаграммы [2]. Выполнен анализ температурного поведения решеточной и аномальной составляющих $\beta(T)$ и деформации. Проведена оценка среднеквадратичной поляризации для исследованных образцов.

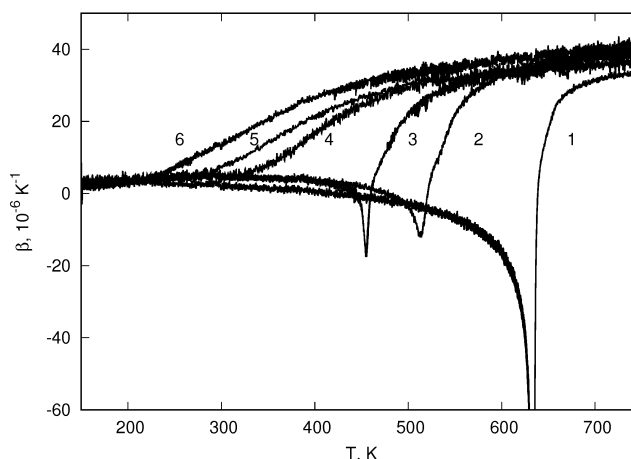


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента объемного теплового расширения керамических образцов $(1-x)\text{PNN}-x\text{PT}$. с $x=0.8$ (1), 0.6 (2), 0.5 (3), 0.3(4), 0.2(5), 0.0 (6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Смоленский Г.А, Аграновская А.И., ЖТФ **28**, 1491 (1958).
2. Lei C., Chen K., Zhang X., Wang J., Solid State Commun. **123**, 445 (2002).
3. Каллаев С.Н., Билалов А.Р., Ферзилаев Р.М., Омаров З.М., Борманис К., Садыков С.М., ФТТ **54**, 1716 (2012).

Эффекты различных режимов прикладываемого электрического поля на ориентационный электроакустический эффект в монокристаллах PMN

Федосеев А.И.¹, Лушников С.Г.¹, Коджима С.²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия (E-mail: fedoseev@mail.ioffe.ru)

²Институт материаловедения, Университет Тсукубы, Тсукуба, Ибараки 305-8573, Япония

$\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (PMN) является модельным соединением при исследовании свойств большого семейства релаксорных сегнетоэлектриков (СЭ) с общей формулой $\text{AB}'\text{B}''\text{O}_3$, в которых разновалентные ионы Mg^{+5} и Nb^{+3} произвольным образом распределены в В-подрешетке. Хорошо известно, что в динамике кристаллической решетки PMN наблюдаются частотно-зависимая, размытая на сотни градусов аномалия диэлектрического отклика, не связанная со структурным СЭ фазовым переходом (ФП). Симметрия кристалла не меняется вплоть до гелиевых температур, оставаясь кубической. Приложение электрического поля (\mathbf{E}) приводит к изменению динамики фазовых превращений - в PMN реализуется СЭ структурный фазовый переход. Результаты исследований PMN при приложенном электрическом поле наглядно отражены в фазовых диаграммах [1]. Хорошо известно, что свойства релаксоров зависят от режимов приложенного поля. Например, при изучении свойств PMN при $E \neq 0$ с помощью Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния (МБР) света был обнаружен электроакустический эффект, проявляющийся в зависимости поведения скорости квазипродольного акустического (QLA) фонона от величины и направления приложенного поля \mathbf{E} [2].

Целью настоящей работы было исследование поведения одного и того же QLA-фонона с волновым вектором $\mathbf{q} \parallel [110]$ в зависимости как от направления приложенного поля (одной и той же величины $E=5 \text{ kV/cm}$), так и от режима его приложения в температурном интервале от 77 до 300 К с помощью МБР света. Использовались следующие режимы приложения электрического поля: 1). Охлаждение при $E=0$ (ZFC), приложение поля при температуре жидкого азота, а затем нагрев в поле (FH); 2). Охлаждение в поле (FC) и нагрев в поле (FH); 3). Охлаждение в поле (FC), снятие поля при температуре жидкого азота и затем нагрев при $E=0$ (ZFH). Эксперименты проводились на 3 образцах PMN размерами $5 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$, вырезанных из одной були PMN, с наибольшими поверхностями, перпендикулярными кристаллографическим направлениям [111], [110] и [100], на которые наносились электроды. Измерения проводились с помощью многопроходного интерферометра Фабри-Перо в 180-градусной геометрии рассеяния. В качестве источника света использовался аргоновый лазер с длиной волны 514.5 нм. В результате исследовалось влияние различных режимов приложения электрического поля вдоль этих направлений на электроакустический эффект. Результаты обсуждаются в рамках современных представлений о физике релаксорных сегнетоэлектриков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-12-00257).

ЛИТЕРАТУРА

1. Colla E.V., Koroleva E.Y., Okuneva N.M., and Vakhrushev, Phys. Rev. Lett., **77**, 1681 (1995); С.Г. Лушников, Дж.-Х. Ко, С. Коджима, Письма в ЖЭТФ, **79**, 11 (2004).
2. S.G. Lushnikov, A.I. Fedoseev, J.- H. Ko and Seiji Kojima, JJP **44**, 7156 (2005).

Пористые диэлектрические пленки: технология, свойства, применения в электронике

Воротилов К.А., Сигов А.С.

Московский технологический университет (МИРЭА) Москва, 119454, Россия

Нано- и мезопористые материалы с различной системой пор (открытой, закрытой, упорядоченной, с различными включениями и пр.) являются новыми физическими объектами с уникальными физическими свойствами и активно исследуются в последние годы в качестве материалов электроники.

Главный интерес полупроводниковой индустрии связан с проблемой т.н. диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью (low k). Проблема снижения диэлектрической проницаемости диэлектрика в системах металлизации обусловлена ростом RC задержки сигнала при уменьшении размеров элементов интегральных схем (ИС). В настоящее время ИС производятся по технологии 14 нм и содержат ~ 10 миллиардов транзисторов, которые коммутируются между собой проводниками с общей длиной ~ 10 км, располагающихся на 9-10 уровнях. Все это приводит к тому, что системы многоуровневой металлизации определяют быстродействие, тепловыделения, а также надежность и стоимость современных ИС. К диэлектрикам для таких применений предъявляется комплекс очень жестких и противоречивых требований, при этом одной из трудно решаемых проблем является достижение баланса между необходимостью обеспечения высокой пористости таких материалов при сохранении их механической прочности.

В настоящее время полупроводниковая индустрия использует предложенный A. Grill процесс химического осаждения из газовой фазы, обеспечивающий формирование пористого кремнийорганического материала с $k = 2.5...2.6$ и приемлемыми механическими свойствами для интеграции в Damascene процесс [1]. Однако потенциал данного метода в настоящее время исчерпан, и дальнейшее продвижение производителей ИС к освоению технологий 10 нм и менее связывают с развитием методов молекулярной самосборки [2], обеспечивающих контроль пористой структуры и возможность эффективного заполнения рельефа проводников (gap filling). В докладе мы приводим данные экспериментальных исследований получения таких структур, анализ факторов, позволяющих обеспечить необходимую совокупность физических свойств.

Подобный подход может быть использован и при формировании пористых сегнетоэлектрических структур и композитов, см. напр. [3]. В докладе рассмотрены проблемы создания пористых сегнетоэлектриков и перспективы их использования в устройствах микро- и наноэлектроники.

Работа выполнена в при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект № 11.2259.2017/ПЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grill A., Gates S., Ryan T., et al. Appl. Phys. Rev. **1**, 011306 (2014).
2. Torres J. M., Bielefeld J., Blackwell J. et al. IEEE International Interconnect Technology Conference, 18 (2016).
3. Seregin D., Vorotilov K., Sigov A., Kotova N. Ferroelectrics, **484**, 43 (2015).

Фазовые переходы в тонких пленках антисегнетоэлектрика PbZrO_3

**Литягин Г.А., Бурковский Р.Г., Князева М.А., Андроникова Д.А.,
Бронвальд Ю.А., Вахрушев С.Б.**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Россия (E-mail: lityagin.g@yandex.ru)

Тонкие эпитаксиальные пленки антисегнетоэлектрика PbZrO_3 (PZO) являются перспективными материалами для конденсаторных накопителей энергии и ячеек памяти высокой плотности [1-2]. В объемных кристаллах PZO при понижении температуры до $T_c \sim 230^\circ\text{C}$ происходит структурный фазовый переход из параэлектрической в антисегнетоэлектрическую фазу. Антисегнетоэлектрическая структура образована антипараллельным смещением ионов свинца. Данные смещения приводят к возникновению сверхструктурных рефлексов (Σ – сверхструктур) в точках с координатами $(\frac{1}{4}+h, \frac{1}{4}+k, l)$. Одновременно происходят противофазные повороты кислородных октаэдров, приводящие к появлению R – сверхструктур в точках с координатами $(\frac{1}{2}+h, \frac{1}{2}+k, \frac{1}{2}+l)$. В то же время, в тонких пленках PZO, эпитаксиальное напряжение может приводить к стабилизации сегнетоэлектрической фазы при достижении некоторой критической толщины пленки (~ 20 нм) [3]. В текущей работе исследовалось влияние эпитаксиального напряжения на развитие структурных нестабильностей в тонких пленках PZO различной толщины (от 25 нм до 1000 нм). В качестве методики исследования использовалось рассеяние синхротронного излучения. Эксперимент был проведен на Европейском Источнике Синхротронного Излучения.

В исследуемых пленках PZO, помимо Σ и R – сверхструктур, было обнаружено наличие M – сверхструктур с координатами $(\frac{1}{2}+h, \frac{1}{2}+k, l)$ и σ – сверхструктур с несоизмерным волновым вектором ($q=0.15$). Для исследуемых пленок были сняты температурные зависимости интегральной интенсивности Σ , R, M и σ – сверхструктур. На рис. 1 представлены данные температурные зависимости для пленки PZO толщиной 50 нм. Из рисунка можно сказать, для эпитаксиальных пленок характерно более сложное поведение структуры, чем для объемных образцов. Наблюдается модификация температурных зависимостей Σ и R – сверхструктур, которая заключается в гораздо более медленном росте интенсивности с понижением температуры. Наличие высокоинтенсивных M – сверхструктурных рефлексов в широком температурном диапазоне наблюдается в данном материале впервые и предположительно может быть связано с антипараллельными смещениями ионов свинца. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-22-00136).

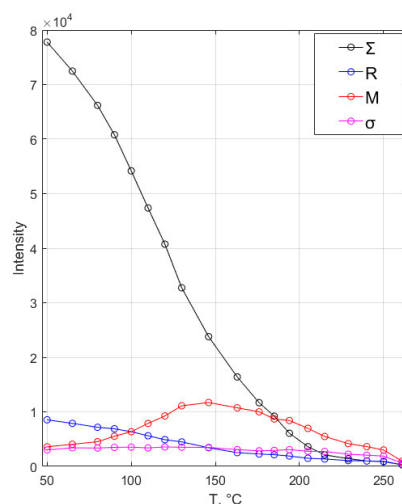


Рис. 1 Температурные зависимости интенсивности сверхструктурных рефлексов

ЛИТЕРАТУРА

1. Scott J. F., Science **315**, 954 (2007).
2. Sharifzadeh Mirshekarloo M. et al., Applied Physics Letters, **97**.14, 142902, (2010).
3. Chaudhuri A. R. et al., Physical Review B, **84**, 054112 (2011).

Тонкие пленки органического сегнетоэлектрика 2-метилбензимидазола $C_8N_2H_8$

Балашова Е.В., Кричевцов Б.Б., Свиначев Ф.Б., Зайцева Н.В.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия (E-mail: balashova@mail.ioffe.ru)

Недавно были обнаружены сегнетоэлектрические и антисегнетоэлектрические свойства в органических кристаллах на основе бензимидазола [1]. В частности, в однокомпонентных органических кристаллах 2-метилбензимидазола $C_8N_2H_8$ (МБИ) при комнатной температуре наблюдалась петля диэлектрического гистерезиса, характерная для сегнетоэлектриков. Спонтанная поляризация возникает вдоль цепочек, образованных молекулами 2-метилбензимидазола, связанными водородными связями, и составляет $P_s \approx 5 \mu C/cm^2$ [1]. Первые пленки МБИ были получены методом «соскабливания раствора» (solution shearing) в виде планарных периодических структур [2]. Целью настоящей работы являлось выращивание на различных подложках пленок МБИ методом испарения, исследование их блочной и кристаллической структуры и диэлектрических свойств.

Наблюдение пленок в поляризационном микроскопе и рентгенодифракционные исследования методом θ - 2θ показали, что пленки МБИ, полученные методом испарения, обладают одним из двух вариантов текстуры в соответствии с псевдотетрагональной структурой кристалла. В первом случае пленки состоят из блоков, представляющих собой расщепленные кристаллы, состоящие из иглообразных кристаллитов, псевдотетрагональная $[001]_{tetra}$ ось в которых ориентирована в плоскости пленки и совершает полный оборот относительно центра блока (рис. 1а). Во втором случае пленка состоит из блоков, в которых ось $[001]_{tetra}$ направлена перпендикулярно плоскости пленки (рис. 1б).

В пленках МБИ при комнатной и более высоких температурах наблюдаются петли гистерезиса. Величина переключаемой поляризации возрастает при нагревании и уменьшается с ростом частоты. Величина остаточной поляризации в пленках $P_r \approx 4,5 \mu C/cm^2$ близка к наблюдаемой в монокристаллах.

При нагревании увеличиваются емкость и диэлектрические потери, возникает частотная дисперсия. Дисперсия связывается с протонной проводимостью с величиной энергии активации $E_a \approx 1$ эВ, характерной для кристаллов и пленок аминокислотных сегнетоэлектриков, имеющих в структуре цепочки с водородными связями.

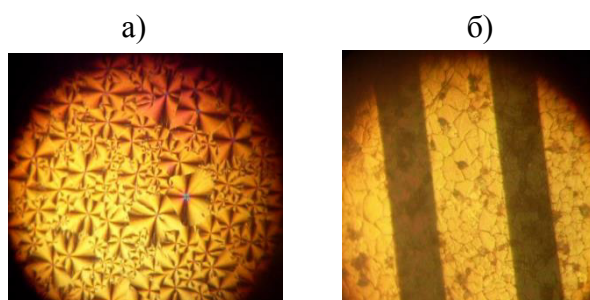


Рис. 1 Фотографии пленок МБИ, полученные с помощью поляризационного микроскопа в скрещенных поляризаторах: (а) блоки представляют собой расщепленные кристаллы (поле изображения $\sim 1,5$ mm); (б) текстура с ориентацией оси $[001]_{tetra}$ нормально к пленке (поле $\sim 0,25$ mm).

ЛИТЕРАТУРА

1. Horiuchi S. et al. Nature Communications **3**, Art.2322 (2012).
2. Noda Y. et al. Advanced Materials **27**, 6475 (2015).

Сегнетоэлектричество в нанопластинках из SnS

Лебедев А.И.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия (E-mail: swan@scon155.phys.msu.ru)

В последнее время резко возрос интерес к сегнетоэлектрическим свойствам квазидвумерных структур – монослоев и нанопластинок толщиной в несколько монослоев [1,2]. В этом отношении исследование сульфида олова SnS, который в объемном виде является слоистым полупроводником и может быть легко расщеплен до монослоев и нанопластинок химическими методами, представляет несомненный интерес. Одним из интересных свойств монослоев из SnS является предсказанное в них сегнетоэлектричество, которое открывает возможность практического использования свойственного сегнетоэлектрикам пьезоэффекта в структурах, сформированных на гибких подложках [3]. В настоящей работе из первых принципов будут изучены сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические свойства монослоев и нанопластинок из SnS.

Расчеты проводились из первых принципов в рамках метода функционала плотности с использованием программы ABINIT и псевдопотенциалов, построенных в приближении локальной плотности (LDA). Равновесные параметры решетки и положения атомов находились путем релаксации сил, действующих на атомы, до величины $2 \cdot 10^{-6}$ Ha/Bohr (0.1 meV/Å). Для расчетов фононного спектра, упругих и пьезоэлектрических модулей использовались формулы, полученные в рамках метода функционала плотности с помощью теории возмущений. Поляризация вычислялась методом фазы Берри.

Расчеты для монослоев SnS подтвердили результаты [3] о возникновении в них сегнетоэлектрической фазы со структурой $Pmn2_1$, однако выигрыш в энергии при сегнетоэлектрическом упорядочении оказался в 30 раз меньше, чем по данным [3]. Детальное сопоставление свойств двухслойных (2ML) нанопластинок с разным типом сопряжения на границе монослоев показало, что основным состоянием в них является неполярная фаза с пр. гр. $P2_1/m$. К нашему удивлению, нанопластинки с толщиной в три монослоя (3ML) вновь оказались сегнетоэлектриками с пр. гр. основного состояния $Pmn2_1$. Исследования более толстых нанопластинок позволили установить, что нанопластинки толщиной 4ML являются неполярными (пр. гр. $P2_1/m$), а нанопластинки толщиной 5ML вновь оказываются сегнетоэлектриками (пр. гр. $Pmn2_1$). Такой периодический характер появления сегнетоэлектричества в нанопластинках из SnS разной толщины объясняется тем, что структура объемного SnS является антисегнетоэлектрической (появление антисегнетоэлектричества в нем стимулируется неподделенной электронной парой Sn^{2+}), и при нечетном числе слоев поляризация в плоскости слоя нанопластинки оказывается нескомпенсированной.

Для всех найденных полярных фаз рассчитаны энергия сегнетоэлектрического упорядочения, поляризация и значения ненулевых компонент упругого и пьезоэлектрического тензоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wu M., Burton J.D., Tsybmal E.Y., Zeng X.C., and Jena P. Phys. Rev. B **87**, 081406 (2013).
2. Shirodkar S.N. and Waghmare U.V. Phys. Rev. Lett. **112**, 157601 (2014).
3. Fei R., Kang W., and Yang L. Phys. Rev. Lett. **117**, 097601 (2016).

Электрооптика наноструктуры «органический сегнетоэлектрик - субволновая алюминиевая решетка»

Блинов Л.М., Лазарев В.В., Юдин С.Г., Палто С.П., Артемов В.В., Горкунов М.В.

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, 119333, Россия (E-mail: lbf@ns.crys.ras.ru)

Исследуется электрооптический эффект в наноразмерной структуре, состоящей из стеклянной подложки, с прозрачным слоем оксида индия с оловом (ИТО) толщиной $d \approx 90$ нм, прозрачной пленки органического сегнетоэлектрика (СЭ)-сополимера P(VDF/TrFE) толщиной $d \approx 30$ нм и слоя Al толщиной $d \approx 100$ нм, контактирующего с воздухом сверху. Пленка СЭ ограничена двумя электродами, т.е. слоями ИТО и Al. В слое Al вытравлена квадратная (30×30 мкм²) одномерная решетка с шагом 0.4 мкм, а в качестве опорного вытравлен такой же квадрат, но без решетки. Измеряются спектры коэффициентов пропускания поляризованного света (ТМ-поляризация) при воздействии на структуру импульсов напряжения длительностью 20 мсек с амплитудой $U_p =$ от 0 до 11 В (через 1 В). Свет галогенной лампы, установленной в микроскопе (увеличение $\times 40$), проходит через опорный квадрат, фиксируя интенсивность прошедшего света (100%), а затем и сквозь решетку, тем самым определяя коэффициент пропускания (КП) с

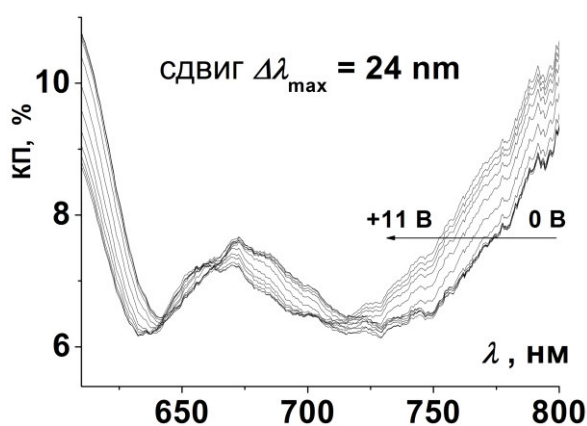


Рис. 1. ТМ-спектры коэффициентов пропускания с плазмонными провалами на длинах волн 646нм и 732нм для импульсов напряжений от 0 до 11 В (через 1 В).

774нм до 753нм (положение КП=7.65% фиксировано той же стрелкой) для $U_p = 0-11$ В. Максимальный сдвиг равен 24 нм. Отсюда можно вычислить величину изменения показателя преломления ($\Delta n \approx -0.05$) от внешнего напряжения.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 14-12-00553 и Государственного задания № 007-ГЗ/Ч3363/26.

ЛИТЕРАТУРА

1. Палто С.П., Барник М.И., Касьянова И.В. и др. Письма в ЖЭТФ **103**, 27 (2016).

Потенциальное сегнетоэлектричество нанолокализованных молекул воды

**Gorshunov B.P.^{1,2,3}, Torgashev V.I.⁴, Zhukova E.S.^{1,2,3}, Thomas V.G.⁵,
Shakurov G.S.⁶, Belyanchikov M.A.^{1,2}, Savinov M.⁷, Kadlec Ch.⁷,
Kadlec F.⁷, Petzelt J.⁷, Ostapchuk T.⁷, Forsenko D. A.⁵, Gorelik V. S.⁸,
Dressel M.³**

¹*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, 141700 Russia*

²*A.M. Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow, 119991 Russia*

³*1. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart, Germany*

⁴*Southern Federal University, 344090 Rostov-on-Don, Russia*

⁵*Institute of Geology and Mineralogy, RAS, 630090 Novosibirsk, Russia*

⁶*Kazan Physical-Technical Institute, RAS, 420029 Kazan, Russia*

⁷*Institute of Physics AS CR, Na Slovance 2, 18221 Praha 8, Czech Republic*

⁸*P.N. Lebedev Physical Institute, RAS, 119991 Moscow, Russia*

Молекула воды, H_2O , обладает большим дипольным моментом $p \approx 2 D$. В то же время взаимная ориентация таких молекул не наблюдается ни в жидкой воде, ни во льду ввиду того, что дальнедействующее диполь-дипольное взаимодействие между молекулами (характерное расстояние 10-100 Å) подавляется более короткодействующими водородными связями (характерное расстояние 1-2 Å). Ситуация может кардинально измениться если отдельные молекулы воды разместить в некоторой матрице на расстоянии, достаточно большом, чтобы подавить водородные связи, но не слишком большим, чтобы диполь-дипольное взаимодействие оставалось существенным. Такого рода «водяное сегнетоэлектричество» должно играть важную роль в различных системах и процессах (физических, химических, биологических, геологических, метеорологических, ...). Явление «водяного сегнетоэлектричества» активно обсуждается и анализируется теоретически и на уровне компьютерных моделирований, но еще ни разу надёжно не наблюдалось экспериментально. Нами исследована подсистема молекул воды, локализованных в наноразмерных порах, образованных ионами кристаллической решетки диэлектрика - берилла [1]; в кристалле берилла соседние молекулы располагаются на расстоянии 5 или 10 Å. С применением радио- и терагерцовой спектроскопии нами выявлены типичные признаки возникновения состояния потенциального сегнетоэлектричества в подсистеме молекул H_2O в кристалле берилла [2]. При охлаждении статическая диэлектрическая проницаемость, обусловленная откликом водяных молекул, возрастает в соответствии с законом Кюри-Вейсса, причём возрастание обусловлено температурной динамикой сегнетоэлектрической мягкой моды, наблюдающейся в терагерцовой области. Ниже 10 К переход в состояние с макроскопической поляризацией подавляется квантовыми флуктуациями и диэлектрическая проницаемость и параметры мягкой моды выходят на плато. Экспериментальные результаты анализируются в рамках усовершенствованной модели среднего поля ориентационного фазового перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wood D.L. and Nassau K., American Mineralogist 53, 777 (1968).
2. Gorshunov B., Torgashev V.I., Zhukova E.S., et al. Nature Communications 7:12842 (2016).

Диэлектрические и магнитные свойства наноструктурированного титаната бария

Аль Мандалави В.М.¹, Короткова Т.Н.², Каширин М.А.¹, Калгин А.В.¹,
Емельянов Н.А.³, Коротков Л.Н.¹

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж, 394026, Россия
(E-mail: l_korotkov@mail.ru)

²Воронежский институт Министерства внутренних дел РФ, Воронеж, 394065, Россия

³Курский государственный университет, Курск, 305000, Россия

В интервале температур 20 – 200 °С изучена электрическая проводимость (σ), линейные и нелинейные диэлектрические свойства наноструктурированного титаната бария со средним размером гранул около 100 нм. Наблюдаемая в интервале частот 25 – $5 \cdot 10^5$ Гц дисперсия действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') компонент диэлектрического отклика (ϵ) и реверсивная диэлектрическая нелинейность в сегнетоэлектрической фазе материала преимущественно обусловлены доменным механизмом.

Обнаружено, что частотные зависимости ϵ' и ϵ'' , как выше, так и ниже температуры Кюри, удовлетворяют «универсальному закону диэлектрической проницаемости».

Установлено, что аномальный термический гистерезис диэлектрической проницаемости, возникающий при циклическом изменении температуры в области Кюри (T_C) вызван взаимодействием межфазных границ с дефектами кристаллической решетки. Предполагается, что именно дефекты типа «случайное поле» ответственны за специфический вид зависимости $T_C(E)$, где E – напряженность электрического смещающего поля.

Результаты исследования электропроводности на постоянном токе показали, что перенос заряда преимущественно осуществляется через «объем» гранул. При этом значительный вклад в σ на переменном токе дают токи смещения, связанные с движением доменных границ и поляризацией Максвелла - Вагнера, обусловленной предположительно миграцией носителей заряда по зернограничному пространству.

Изучены при комнатной температуре зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля для наноструктурированного и объемного образцов $BaTiO_3$.

Установлено, что наноструктурированный титанат бария демонстрирует одновременно диамагнитные и ферромагнитные свойства. Его отжиг в атмосфере водорода привел к существенному повышению спонтанной намагниченности ($M_s \approx 0,04$ Ам²/кг) и ослаблению диамагнитного отклика. Полученные результаты говорят в пользу того, что вакансии атомов кислорода, присутствующие на границах зерен, ответственны за электронные состояния, продуцирующие ферромагнитный и диамагнитные отклики.

Диэлектрические свойства нанокристаллической керамики BiFeO_3

Садыков С.А., Д.К. Палчаев, Ж.Х. Мурлиева, Н. М.-Р. Алиханов, С.Н. Каллаев*, С.М. Алиева

Дагестанский государственный университет, Махачкала, 367000, Россия (E-mail: ssadyk@yandex.ru)

**Институт физики ДНЦ РАН, Махачкала, 367000, Россия*

Представлены результаты исследования частотных и температурных зависимостей диэлектрических свойств (электропроводность, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери) керамики BiFeO_3 , полученной методом искрового плазменного спекания нанопорошка, синтезированного сжиганием нитрат – органического прекурсора. Измерения проводились в частотном диапазоне 1 кГц–10 МГц в интервале температур 25–500°C.

Результаты диэлектрических измерений показали, что обе компоненты ϵ испытывают сильную частотную дисперсию. При этом интенсивный температурный рост действительной ϵ' и мнимой ϵ'' части начинается выше 300°C. Максимум ϵ' при $T > 400$ °C имеет характерный для релаксоров частотно-зависимый характер, причем этот максимум с увеличением частоты смещается в область высоких температур и уменьшается по величине.

Анализ экспериментальных данных частотных зависимостей электропроводности σ_{ac} проведен в рамках степенного закона Джоншера: $\sigma \sim \omega^s$, где $s < 1$. В области частот > 100 кГц поведение проводимости согласуется с представлениями модели коррелированных барьерных прыжков (correlated barrier hopping) носителей заряда. Прыжковый механизм, предположительно, реализуется между ионами Fe^{2+} и Fe^{3+} в зернах керамики. Низкочастотная проводимость идентифицируется с проводимостью на постоянном токе.

В области высоких частот (> 1 МГц) меняется характер температурной зависимости проводимости: при некоторой температуре T^* проводимость проходит через максимум, причем с ростом частоты T^* смещается в сторону низких температур. Релаксация σ_{ac} наблюдается при частотах $\omega > 100$ кГц и резко усиливается при $\omega > 1$ МГц. Смещение температуры ΔT^* максимума проводимости σ_{ac} в диапазоне частот 1-10 МГц достигает 25°C.

Вид зависимости $\sigma_{ac}(\omega)$ при различных температурах указывает на ее термо-активационный характер, причем энергия активации E_A уменьшается с ростом частоты. В исследованном температурном диапазоне ход этой зависимости формируют три перекрывающиеся релаксационных процесса: от 25 до 150°C с энергией активации $E_A = 0,46\text{--}0,042$ эВ; от 150° до 350°C с $E_A = 0,65\text{--}0,11$ эВ; при температурах > 350 °C с $E_A = 0,96\text{--}0,76$ эВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гос. задания № 3.5656.2017/БЧ и проекта РФФ №15-19-10049.

Пироэлектрический эффект в слоистых сегнетоэлектрических гетероструктурах

Солнышкин А.В.^{1,2}, Кислова И.Л.¹

¹*Тверской государственный университет, Тверь, 170100, Россия
(E-mail: a.solnyshkin@mail.ru)*

²*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
124498, Москва, Зеленоград, Россия*

Работа посвящена изучению пироэлектрических свойств неоднородных систем. В качестве объектов исследования использованы структуры, содержащие сегнетоэлектрические слои: тонкие пленки на подложках различных типов и композиты связности 2-2. Пироэлектрический эффект исследован динамическим методом с использованием инфракрасного излучения, модулированного импульсами прямоугольной формы в частотном диапазоне $10^{-1} - 10^4$ Гц. В качестве источника теплового потока использовался лазерный модуль CLM – 1845 IR – 980, генерирующий излучение с длиной волны 980 нм и мощностью 220 мВт. Пироэлектрический отклик образцов усиливался операционным усилителем и регистрировался платой сбора данных ЛА-н150-14РСІ.

Установлено, что кинетика пироэлектрического тока тонкопленочной гетероструктуры существенно зависит не только от тепловых свойств сегнетоэлектрической пленки, но и определяется тепловыми характеристиками подложки. В частности, при равенстве коэффициентов теплового расширения пленки и подложки воздействие модулированного теплового потока приводит к появлению резкого начального выброса тока с последующей релаксацией до нулевого уровня, если коэффициенты теплового расширения сегнетоэлектрического слоя и подложки существенно различаются, релаксация тока происходит до некоторого отличного от нуля квазистационарного значения. Для анализа формы пироэлектрического отклика выполнен расчет временных зависимостей пиротока $I_{\text{пиро}}(t)$. Расчетные зависимости $I_{\text{пиро}}(t)$ имеют начальный выброс тока с последующим релаксационным спадом до нулевого значения, время спада определяется толщиной пленки и подложки, а также их теплопроводностью. Различие расчетных и экспериментальных зависимостей $I_{\text{пиро}}(t)$ для образцов, характеризующихся наличием квазистационарной компоненты пиротока, обусловлено возникновением тепловых деформаций подложки, механически связанной с сегнетоэлектрической пленкой. Значительное различие в коэффициентах теплового расширения пленки и металлической подложки вызывает дополнительную деформацию сегнетоэлектрического слоя, обуславливая появление пьезоэлектрической компоненты отклика.

При воздействии модулированного теплового потока на образец композита связности 2-2, содержащего сегнетоэлектрический слой, появляется сигнал, обусловленный как пироэлектрическим эффектом, так и пьезоэлектрическим, который связан с механическим взаимодействием слоев. Этот отклик имеет импульсный характер как в начальный момент воздействия теплового потока, так и по его окончании. Он может превосходить пироэлектрический ток по величине, а также давать вклад в пироэлектрический отклик на протяжении всего времени воздействия теплового потока, изменяя форму сигнала. Анализ наблюдаемого отклика позволяет определить степень механической связи слоев.

Работа поддержана Российским Научным Фондом, проект № 16-19-10112.

Наноструктуры «оксид графена - полимерные пленки»

Быстров В.С.^{1,2}, Силибин М.В.², Бдикин И.К.^{2,3}

¹*Институт математических проблем биологии, ФИЦ ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Пущино, 142290, Россия (E-mail: vsbys@mail.ru)*

²*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, 124498, Россия*

³*TEMA-NRD, Mechanical Engineering Department and Aveiro Institute of Nanotechnology (AIN), University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal*

Исследование наноструктур на основе графена и оксида графена развивается быстро, т.к. имеет множество перспективных применений. Недавно были получены и экспериментально изучены новые композитные материалы на их основе с включением сегнетоэлектрических тонких плёнок сополимеров поливинилиденфторида (ПВДФ) и поли(винилиденфторид-трифторэтилена) (П(ВДФ-ТрФЭ)), демонстрирующих переключение сегнетоэлектрической поляризации и пьезоэффект [1, 2]. Для выяснения особенностей и механизмов этих явлений нами было предпринято построение молекулярных моделей указанных наноструктур и проведено моделирование их свойств на основе ранее развитой нами модели ПВДФ и особенностей поведения полимерных цепочек в электрическом поле [3]. Полученные результаты показывают хорошее согласие с экспериментальными данными.

В данной работе было выполнено компьютерное моделирование и последовательное изучение молекулярных моделей различных структур графена, оксида графена и их композита с цепочками ПВДФ. Все версии моделей были разработаны и исследованы с использованием программ HyperChem 8.0. Мы исследовали основные электрические и физические свойства ПВДФ и нанокомпозитов «графен/оксид графена — ПВДФ» (их дипольные моменты, объемы моделируемых кластеров и их изменения, поляризацию, энергии электронных подсистем, и рассчитывали пьезоэлектрические коэффициенты по алгоритму разработанному в статье [3]). С помощью специальной опции в HyperChem, позволяющей имитировать включение электрического поля в различных направлениях, нами изучалось влияние приложенного электрического поля на структуру моделей в различных составах и слоях, изменение положений отдельных атомов при оптимизации структур в приложенном электрическом поле и определяли их взаимную деформацию. При проведении моделирования и расчетов были использованы различные вычислительные методы, включая квантово-химические расчеты, основанные также и на полуэмпирических методах (PM3) в приближении метода ограниченного Хартри-Фока (ОХФ). Полученные нами значения пьезоэлектрических коэффициентов для разных моделей хорошо согласуются с данными пьезо-силовой микроскопии. Так, проведенное моделирование показывает качественное совпадение свойств и снижение значений для величин $d_{3\text{eff}}$ пьезоэлектрического коэффициента под влиянием G/ GO слоев графена/оксида графена, что и наблюдается в эксперименте методами атомной и пьезо-силовой микроскопии [2, 4]. Работа поддержана грантом РФФИ № 16-19-10112.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров В.С., Бдикин И., Силибин М. др., В кн.: Докл. «VI между. конф.: Мат. биол. биоинф., Пущино, 16-21 октября 2016 г.» - М.: МАКС Пресс, 2016. - стр. 29.
2. Silibin M.V., Bystrov V.S., Karpinsky D.V. et al, Appl. Surf. Sci., in print (2017).
3. Bystrov V.S., Paramonova E.V., Bdikin I.K., et al., J. Mol. Mod., **19**, 3591 (2013).
4. Bystrov V.S., Bdikin V.K., Silibin M.V et al., Ferroelectrics, in print (2017).

Магнитные стекла и сегнетоэлектрические наноккомпозиты на их основе

**Набережнов А.^{1,2}, Сысоева А.¹, Королева Е.^{1,2}, Ванина П.², Tovar M.⁵,
Голосовский И.³, Андреева Н.⁴, Nacke В.⁶, Nikanorov A.⁶, Nizhankovskii V.⁷**

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН С.-Петербург, 194021, Россия
(E-mail: alex.naberezhnov@mail.ioffe.ru)

² С.-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
С.-Петербург, 195251, Россия

³ НИЦ «Курчатовский институт» Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова, 188300, Гатчина, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, 197376, Россия

⁵ Helmholtz Zentrum Berlin, D-14109, Berlin, Germany

⁶ EPT, Leibniz Universität Hannover, 30167, Hannover, Germany

⁷ International Lab. of High Magnetic Fields & Low Temperatures, 53-421 Wroclaw, Poland

Методом индукционной плавки в керамическом тигле изготовлены щелочно-боросиликатные стекла с магнитными свойствами. Появление магнитных свойств связано с переходом гематита (α - Fe_2O_3), присутствующего в исходной шихте, в магнетит (Fe_3O_4) при высоких температурах. Оптимизирован исходный состав, при котором α - Fe_2O_3 практически полностью переходит в фазу магнетита. Методом АФМ показано, что в полученных после термической обработки стеклах происходит фазовое расслоение на кремнеземную и химически-нестойкую фазу (ХНФ), образующую многосвязную дендритную систему. На следующем этапе было проведено вытравливание ХНФ и получены пористые матрицы двух типов: в первом (микропористые) средний диаметр каналов (пор) составлял около 6 нм (PG6), а во втором (макропористые) – примерно 60 нм (PG60). Были исследованы магнитные и структурные свойства обоих типов стекол, которые хорошо совпадают со свойствами аналогичных матриц, полученных в работе [1] методом варки в платиновом тигле с механическим перемешиванием. Измерены полевые зависимости коэффициентов магнитострикции для данных типов матриц, а из анализа дифракционных спектров получены характерные размеры наночастиц магнетита в каркасе матриц (~ 16 нм). На основе микро- и макропористых магнитных стекол изготовлены образцы, содержащие в порах внедренные сегнетоэлектрики NaNO_2 , KNO_3 , KH_2PO_4 (KDP) и твердые растворы состава $\text{KH}_2\text{PO}_4(1-x)+\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4(x)$ ($x=0.05, 0.1, 0.15$). Все материалы вводились из водного раствора. Проведены предварительные исследования влияния приложенного магнитного поля (до 14 Т) на сегнетоэлектрические фазовые переходы (ФП) в наноккомпозитах (НКМ) на основе PG6 и PG60. Для НКМ PG60+ KDP обнаружен сдвиг T_C вверх на ~ 6 К в поле 10 Т, причем сдвиг линеен по полю в интервале 1-10 Т, а также появление температурного гистерезиса с $\Delta T \approx 6$ К в зависимостях $\epsilon(T)$ при нагреве и охлаждении [2]. Для НКМ PG60+ NaNO_2 приложение поля более 2 Т приводило к уменьшению величины параметра порядка вблизи T_C примерно на 30 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-22-00136).

ЛИТЕРАТУРА

1. T. V. Antropova, I. N. Anfimova, I. V. Golosovsky et al. Physics of the Solid State, 54(10), 2110 (2012).
2. E. Koroleva, A. Naberezhnov, V. Nizhankovskii et al. Tech. Phys. Lett., 41(10), 981 (2015).

Влияние внешнего и внутреннего давлений и электрического поля на свойства композитов нанопористое стекло – NH_4HSO_4

Михалева Е.А.¹, Флёров И.Н.¹, Карташев А.В.¹, Горев М.В.¹,
Богданов Е.В.^{1,2}, Бондарев В.С.¹, Коротков Л.Н.³, Rysiakiewicz-Pasek E.⁴

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия (E-mail: katerina@iph.krasn.ru)

² Красноярский Государственный Аграрный Университет, Красноярск, 660049, Россия

³ Воронежский Государственный Технический Университет, Воронеж, 394026, Россия

⁴ Institute of Physics, Wrocław University of Technology, 50-370 Wrocław, Poland

Одно из информативных и перспективных направлений исследований материалов связано с композитами, в формировании свойств которых большую роль играет непосредственное взаимодействие их исходных компонентов [1]. Наиболее популярными среди довольно многочисленных объектов исследований являются композитные материалы, активную основу которых составляет сегнетоэлектрик, испытывающий фазовые переходы. По сравнению с объемными и слоистыми композитами наиболее значительное пространственное уменьшение размеров исходного активного компонента удастся реализовать при создании нанокompозита в виде сегнетоэлектрика, внедряемого в нанопористую пассивную матрицу. Такого рода материалы представляют наибольший интерес, так как именно в них в значительной мере возрастает роль поверхностных явлений и упругого взаимодействия матрицы и внедряемого компонента.

В представленной работе выполнены исследования нанокompозитов, приготовленных путем внедрения из расплава кислого сульфата аммония в поры матрицы боросиликатного стекла с различным диаметром пор: 5, 23, 46, 160 и 320 нм. Использование в ходе работы именно сегнетоэлектрика NH_4HSO_4 является очень привлекательным, так как он испытывает два фазовых перехода (P-1 ($T_2 = 160 \text{ K}$) \rightarrow Pс ($T_1 = 271.7 \text{ K}$) \rightarrow P2_{1/c}) разного рода, сопровождающихся существенно отличающимися энтропиями, а также позволяет надежно фиксировать отклик на воздействие электрическим полем и гидростатическим давлением.

В результате исследований получены сведения о поведении теплоемкости, теплового расширения, восприимчивости к гидростатическому давлению и диэлектрических свойств как исходных компонентов, так и нанокompозитов. Выявлены особенности изменения аномальных вкладов в энтропию и коэффициент теплового расширения, связанных с фазовыми переходами в NH_4HSO_4 , находящемся в условиях ограниченной геометрии. Установлен характер влияния частоты измерительного электрического поля и напряженности смещающего поля на диэлектрические параметры сегнетоэлектрического компонента. Данные, полученные в ходе исследований фазовых диаграмм температура-давление композитов, подтверждают расширение температурного интервала стабильности сегнетоэлектрической фазы под давлением, обнаруженное нами в объемных образцах кислого сульфата аммония.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumzerov Y., Vakhrushev S. *Nanostructures within porous materials*. In: Nalwa HS, eds. Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. New-York: American Scientific Publishers; **10**, 1 (2003).

Фазовые переходы и диэлектрические свойства нанокompозита CoO-NaNO_2 –пористое стекло

**Бурдин Д.Ю.¹, Королева Е.Ю.^{1,2}, Кумзеров Ю.А.², Сысоева А.А.²,
Филимонов А.В.¹, Вахрушев С.Б.^{1,2}**

¹ СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Россия

² ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Россия

(E-mail: e.yu.koroleva@mail.ioffe.ru)

Наиболее заметно размерные эффекты проявляются вблизи различных фазовых переходов, в том числе вблизи переходов плавления и кристаллизации, сегнетоэлектрических и магнитных фазовых переходов. Одним из способов создания наноструктурированных материалов является внедрение активных составляющих в пористые структуры с характерным размером пор порядка единиц и десятков нанометров. Также фундаментальный интерес представляет внедрение одновременно не одной, а нескольких активных компонент в матрицу с сохранением большой площади контакта между ними в ограниченной геометрии. Есть все основания ожидать появления эффектов, связанных с межфазным взаимодействием на наноуровне. Вполне вероятно, что на этом пути открывается возможность создания новых типов композитных мультиферроиков.

Нами исследованы диэлектрические свойства наноструктурированного композитного мультиферроика на основе силикатных пористых стекол, заполненных одновременно магнитным (оксид кобальта CoO) и сегнетоэлектрическим (нитрит натрия) материалами, в широком температурном (270 – 570 К) и частотном диапазонах (10^{-1} - 10^7 Гц). Средний диаметр пор пористой матрицы составляет 7 ± 1 нм. Частицы магнитного материала синтезировались непосредственно в порах матрицы стекла и занимали около 10% объема пор. NaNO_2 хорошо смачивает пористые стекла и легко вводится в них (занимая оставшиеся незаполненными 90% объема пор). Исследовался диэлектрический отклик матриц, как заполненных обеими компонентами, так и по отдельности. Анализ полученных данных позволил выявить вклады отдельных компонент в диэлектрический отклик композита и влияние ограниченной геометрии на их диэлектрические свойства. Температуры плавления и кристаллизации NaNO_2 в порах равны 511 и 487 К, соответственно, и лежат ниже точки плавления объемного нитрита натрия (544К). В стекле с CoO нитрит натрия претерпевает фазовые переходы в несоразмерную фазу при 421 К и сегнетоэлектрическую фазу при 410 К. Обе температуры ниже, чем в объемном нитрите натрия (437.5К и 436.7К, соответственно). Таким образом температурный диапазон существования несоразмерной фазы увеличился более, чем в 10 раз. Получены и проанализированы температурные зависимости DC-проводимости всех исследуемых образцов. Обнаружено, что внедрение наночастиц CoO приводит к увеличению более чем на порядок диэлектрической проницаемости и проводимости двухкомпонентного композита по сравнению с композитом только с одним нитритом натрия и к уменьшению энергий активации во всем исследованном температурном диапазоне.

Часть экспериментальных результатов получена в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ в СПбПУ, Кумзеров Ю.А. благодарит РФФИ (грант 15-02-01413) за финансовую поддержку.

Диэлектрические свойства нанопористых пленок Al_2O_3 , заполненных сегнетоэлектриком $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$

Милинский А.Ю., Барышников С.В., Антонов А.А.

Благовещенский государственный педагогический университет,
Благовещенск, 675000, Россия (E-mail: a.milinskiy@mail.ru)

Исследования малых сегнетоэлектрических частиц выявили существенные изменения их свойств по сравнению с объемными кристаллами. Одним из способов получения малых сегнетоэлектрических частиц является внедрение сегнетоактивных материалов в пористый оксид алюминия (Al_2O_3), представляющий собой пленку субмиллиметровой толщины с регулярно расположенными порами-каналами, ориентированными перпендикулярно поверхности [1,2]. В настоящей работе представлены результаты исследований линейных и нелинейных диэлектрических свойств тиомочевины, внедренной в пленки оксида алюминия фирмы «TopMembranes Technology». Используемые пленки Al_2O_3 имели одинаковое расстояние между центрами пор (125 nm), но разные диаметры пор (100 и 60 nm). Глубина пор составляла 50 мкм, так что такие заполненные матрицы можно рассматривать, как систему параллельных сегнетоэлектрических наностержней.

На температурной зависимости ϵ' , полученной для монокристалла (рис.1) видны три аномалии. Самая сильная аномалия ϵ' наблюдается при температуре T_c , соответствующей фазовому переходу из сегнетоэлектрической фазы I в фазу II. Более слабый рост диэлектрической проницаемости виден вблизи температуры T_i фазового перехода между несоизмеримой структурой и парафазой V. Пик диэлектрической проницаемости в интервале промежуточных температур соответствует появлению сегнетоэлектрической модулированной фазы III.

Температурные зависимости диэлектрической проницаемости для нанокompозитных образцов сильно размыты и приобретают активационный характер. Видны два максимума на кривых $\epsilon'(T)$ для тиомочевины, внедренной в нанопористые пленки оксида алюминия. Эти максимумы заметно сдвинуты в область высоких температур что свидетельствует о повышении температуры фазовых переходов T_c и T_i , тем больше, чем меньше размер пор. Отметим, что температура максимумов диэлектрической проницаемости не изменяется заметным образом при измерениях на различных частотах, хотя само максимальное значение проницаемости существенно уменьшается с ростом частоты. Температурная зависимость коэффициента третьей гармоники γ_3 так же указывает на увеличение температур T_c и T_i для нанокompозитных образцов.

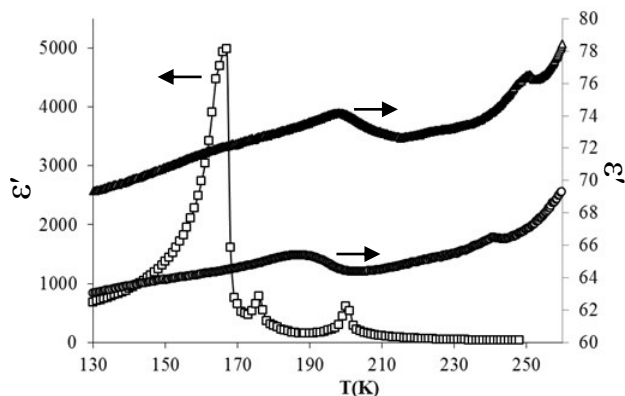


Рис.1 Зависимость $\epsilon'(T)$ для монокристалла тиомочевины (квадраты) и пористого оксида алюминия Al_2O_3 с размерами пор 100 (круги) и 60 (треугольники) nm с сегнетоэлектрическими включениями тиомочевины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yadlovker D., Berger S. Phys. Rev. B **71**, 184112 (2005).
2. Baryshnikov S. V., Charnaya E. V., Stukova E. V., et al. Ferroelectrics. **396**, 3 (2010).

Экстремальные электромеханические характеристики и микроструктурные особенности сегнетопъезокерамик на основе титаната свинца

**Рыбьянец А.Н., Луговая М.А., Константинов Г.М., Швецова Н.А.,
Макарьев Д.И.**

*Южный федеральный университет Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194
(E-mail: arybyanets@gmail.com)*

Для пьезокерамических материалов на основе титаната свинца (PbTiO_3) характерны высокая температура Кюри ($T_K \approx 490\text{C}$), большая величина спонтанной поляризации ($P_s \approx 0,8 \text{ Кл/м}^2$), низкие значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{33}^T / \epsilon_0 \approx 170$) и высокая анизотропия пьезоэлектрических свойств ($|d_{31}| \ll d_{33}, d_{15}$) [1]. Известно, что получение поликристаллических образцов чистого PbTiO_3 связано с большими технологическими трудностями вследствие их хрупкости, высокой электропроводности и сегнетожесткости. Только при модифицировании PbTiO_3 удается предотвратить растрескивание пьезокерамики и получить хорошо поляризованные образцы [1]. Несмотря на длительные исследования, многие аспекты взаимосвязи микроструктурных особенностей и электромеханических характеристик, а также физические механизмы ответственные за пьезоэлектрическую анизотропию твердых растворов на основе PbTiO_3 остаются не вполне ясными.

Целью настоящей работы являлось исследование микроструктурных особенностей и электрофизических параметров ряда твердых растворов на основе PbTiO_3 . В качестве объектов исследования были выбраны твердые растворы $(\text{Pb}_{1-3/2x+z/2}\text{Nd}_x)(\text{Ti}_{1-y-z}\text{Mn}_y\text{In}_z)\text{O}_3$ и $\text{Pb}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ti}_{1-y}(\text{W}_{1/2}\text{Co}_{1/2})\text{O}_3$ с экстремальными (сверхнизкими и сверхвысокими) значениями механической добротности и электромеханической анизотропии. Образцы сегнетопъезокерамик получались методами обычного спекания и горячего прессования. Комплексные упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические параметры экспериментальных образцов были определены с помощью метода анализа пьезорезонансных спектров и программного пакета PRAP. Микроструктурные исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа (НИТАСНИ ТМ 1000) и оптического микроскопа (NeoPhot-21). Структурные параметры экспериментальных образцов определялись с помощью рентгеновского дифрактометра Дрон 7. В результате выполненных исследований показано, что экстремальные значения механической добротности и пьезоэлектрической анизотропии исследованных твердых растворов на основе PbTiO_3 обусловлены микроструктурными особенностями, связанными с технологическими режимами получения сегнетопъезокерамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данцигер А.Я., Разумовская О.Н., Резниченко Л.А., Сахненко В.П., Клевцов А.Н., Дудкина С.И., Шилкина Л.А., Дергунова Н.В., Рыбьянец А.Н. *Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна активных материалов.* Ростов н/Д: Изд-во Ростовского университета. **1**, 408 с. (2001).

Новые методы и конструкции фокусирующих пьезопреобразователей для ультразвуковой диагностики и терапии

**Швецова Н.А., Макарьев Д.И., Швецов И.А., Щербинин С.А.,
Рыбьянец А.Н.**

*Южный федеральный университет Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194
(E-mail: yfnfif_71@bk.ru)*

Ультразвуковые методы применяются как для диагностики заболеваний, так и для воздействия на кровеносные сосуды с целью гемостаза (остановки кровотечения), облитерации (закупорки сосудов) и для локального нагрева тканей (абляция) при лечении онкологических и некоторых сердечно-сосудистых заболеваний [1]. Одним из перспективных применений пьезокерамических и композиционных материалов являются фокусирующие преобразователи высокой интенсивности (HIFU). Существующие HIFU преобразователи, постоянно совершенствуются, но остаются критическим фактором, сдерживающим расширение областей применения HIFU терапии. HIFU преобразователи, а также исходные композиционные пьезоэлектрические материалы и пьезоэлементы являются предметом ноу-хау нескольких зарубежных компаний и в настоящее время в РФ промышленно не производятся.

Настоящая работа посвящена разработке новых методов и конструкций HIFU преобразователей для ультразвуковой диагностики и терапии. Разработаны и исследованы новые конструкции HIFU преобразователей на основе высокоэффективных композиционных материалов. Описаны новые методы формирования HIFU полей с использованием динамической фокусировки и гармонического многочастотного возбуждения, а также методы HIFU терапии и диагностики с использованием ударно-волновых ультразвуковых импульсов, сдвиговых волн и гиперфокусированных ультразвуковых пучков. Выполнено конечно-элементное и конечно-разностное моделирование HIFU преобразователей и процессов распространения ультразвуковых волн в биологических тканях. Проведены измерения параметров пьезокерамических материалов, пьезоэлементов и фокусирующих ультразвуковых преобразователей.

Результаты выполненных исследований позволят организовать производство не имеющих промышленных аналогов отечественных пьезокомпозитных материалов, фокусирующих пьезоэлементов и HIFU преобразователей на их основе, а также создать новое поколение ультразвуковой медицинской аппаратуры с использованием новых современных методик диагностики и лечения социально значимых заболеваний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rybyanets A.N., Naumenko A.A., Shvetsova N.A., Khokhlova V.A., Sapozhnikov O.A., Berkovich A.E. *In: Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics.* **175**, Chapter 44, 621 (2016).

Перспективный высокотемпературный сенсор вибрации, колебаний и пульсаций на основе монокристаллического ниобата лития

**Кубасов И.В., Быков А.С., Малинкович М.Д., Кислюк А.М.,
Пархоменко Ю.Н., Темиров А.А., Киселев Д.А.**

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Москва, 119991 ГСП-1, Россия (E-mail: kubasov.ilya@gmail.com)*

Непрерывное развитие высокотехнологичных секторов экономики, таких как авиакосмическая техника, автомобилестроение, нано- и микроэлектроника, специальная техника (в том числе системы безопасности и контроля), гражданское и военное строительство, определяет возрастающие потребности в устройствах, способных детектировать вибрации, колебания и пульсации в агрессивных температурных условиях (повышенные или пониженные температуры) с высокой точностью. В наши дни функционирование большинства датчиков вибрации основано на использовании пьезоэлектрического или оптического (интерферометрического) методов преобразования механической энергии в электрическую. В то время как оптические сенсоры вибраций являются довольно сложными и громоздкими и чаще используются для высокоточных измерений, датчики на основе пьезоэлектриков являются более простыми, дешевыми и надежными, что позволяет применять их для решения широкого спектра задач.

Одновременно с этим, создание датчика регистрации вибраций при высоких температурах (более 400 °С) сталкивается с рядом проблем, не позволяющих создать высокочувствительный пьезоэлектрический преобразователь. В частности, подавляющее большинство материалов с высокими пьезоэлектрическими коэффициентами являются сегнетоэлектриками с низкой температурой Кюри, теряющими свои пьезоэлектрические свойства выше 300 – 350 °С.

В настоящей работе предложена конструкция и технологический прием изготовления высокотемпературного сенсора вибрации, колебаний и пульсаций с чувствительным элементом, изготовленным из бидоменного монокристалла ниобата лития. Некоторые методики получения таких бидоменных кристаллов были описаны ранее [1-3]. Основными преимуществами бидоменных кристаллов является возможность работы по биморфному принципу при отсутствии клеевых слоев или межзеренных границ. Являясь высокотемпературным сегнетоэлектриком, ниобат лития демонстрирует температурную стабильность пьезоэлектрических свойств в широком интервале температур, а преобразователи на его основе не имеют гистерезиса и крипа, что позволяет изготавливать прецизионные высокотемпературные датчики вибрации с линейными и хорошо воспроизводимыми характеристиками.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы») (ID проекта RFMEFI57816X0187).

Моделирование динамических режимов работы многослойного пьезокерамического актюатора

Храмцов А.М.¹, Нерсесов С.С.¹, Сегалла А.Г.¹, Спицин А.И.¹,
Азин А.В.², Рикконен С.В.²

¹ Научно-исследовательский институт «Элпа» Москва, Зеленоград, 124460
(E-mail: opt@elapiezo.ru)

² Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета г. Томск, 634050, Россия

В данной статье будут представлены результаты конечно-элементного моделирования (КЭМ) и одномерного математического моделирование методом электрических аналогий многослойного пьезокерамического актюатора [1,2] при работе в динамическом режиме с инерционными нагрузками (3 кг и 35 кг). Представлены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик и результаты нестационарного анализа (расчет переходных процессов) пьезокерамического актюатора. Для верификации математических моделей был изготовлен специализированный испытательный стенд, позволяющий проводить исследования динамических режимов работы актюаторов. Произведено сравнение расчетных резонансных частот при воздействии инерционной массы 3 кг с данными полученными на испытательном стенде. Испытания проводились на образцах из отечественной пьезокерамики ЦТС-46 (производитель АО «НИИ «Элпа» Зеленоград) [3]. Полученные результаты показали, что предлагаемые математические модели правильно отражают физику процесса работы колебательной системы пьезоактюатора. Частотные характеристики вибросмещение, полученные по трехмерной КЭМ, являются наиболее точными и имеют расхождение с экспериментом в 5-8% в отличие от одномерной математической модели, для которой расхождение с экспериментом составило 15-20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.М. Храмцов, А.В. Азин, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен Математическое моделирование режимов работы пьезодвигателя // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика, 2016. – № 6(44). – 6 с.
2. А.М. Khramtsov, A.V. Azin, E. P. Bogdanov, S.V. Ponomarev, S.V. Rikkonen Microlinear piezo-drive experiments // IOP: Materials Science and Engineering, 2016. – p.6.
3. Пьезоэлектрические актюаторы [Электронный ресурс] // АО НИИ Элпа, 2016
URL: <http://www.elapiezo.ru/Datasheets/AKTUATORS%20multilayer.pdf>
(дата обращения: 13.01. 2017).

Микроструктура и электрофизические свойства высокотемпературной пьезокерамики $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$

Спицин А.И.^{1,2}, Буш А.А.², Каменцев К.Е.², Нерсесов С.С.¹,
Сегалла А.Г.¹, Чистякова Н.А.¹, Храмцов А.М.¹

¹Акционерное общество научно-исследовательский институт «Элма», Зеленоград,
Москва, 124460, Россия (E-mail: opt@elpapiezo.ru)

²Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454, Россия

В работе использован метод одноосного горячего прессования и технология литья керамической пленки, как способ получения текстурированных образцов сегнетоэлектрической висмут содержащей фазы $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$ со слоистой перовскитоподобной структурой [1,2,3]. Получены текстурированные образцы керамики $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$, на которых проведены рентгенографические, электронномикроскопические, диэлектрические, пьезоэлектрические и пирозлектрические исследования. Установлена однофазность образцов и их принадлежность к структурному семейству слоистых перовскитоподобных пьезоматериалов со структурой Ауривиллиуса [4,5]; по дифрактограммам, снятым в геометрии Θ - 2Θ с параллельных и перпендикулярных оси прессования срезов образцов, определена степень их текстурирования и ее зависимость от технологических факторов. Исследования электронной микроскопией показали, что микроструктура образцов, полученных методом горячего прессования, характеризуется упорядоченной ориентацией пластинчатых кристаллитов с псевдотетрагональной осью c , параллельной прикладываемому давлению. В области температур 290 – 1250 К и диапазоне частот 25 Гц – 1 МГц изучены особенности температурно-частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и потерь, определены точка Кюри полученных образцов (1182 К) и анизотропия диэлектрических свойств. Поляризованные образцы проявляют выраженные пьезоэлектрический и пирозлектрический эффекты. Определены основные характеристики указанных эффектов. Величина пьезомодуля d_{33} горячепрессованной керамики составляет при комнатной температуре 17 пКл/Н, что примерно в три раза превосходит соответствующее значение d_{33} изотропной керамики $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$. Установлена сохранность пьезоэлектрических характеристик после длительной (1000 ч) выдержки при температуре 750°C.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Okazaki, H. Igarashi, K. Nagata, T. Yamamoto and S. Tashiro Symp. Appl. Ferroelectrics **86**, 328(1986).
2. T. Kimura j. Ceram. Soc. Jap **114**[1], 15 (2006).
3. T. Kimura, Y. Yi and F. Sakurai Materials, **3**, 4965 (2010).
4. B. Aurivillius Arkiv Kemi., **1**, 463 (1949).
5. B. Aurivillius Arkiv Kemi., **1**, 499 (1949).

Сегнетоэлектрики в терагерцовом поле

**Мишина Е.Д.¹, Гришунин К.¹, Билык В.¹, Сигов А.С.¹, Кимель А.В.¹,
Агранат М.Б.²**

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454, Россия
(E-mail: mishina_elenas7@mail.ru)

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412, Россия

Скорость переключения параметра порядка в сегнетоэлектрике является предметом интенсивных исследований на протяжении десятилетий. В данной работе приведены результаты экспериментального и теоретического исследования динамического переключения поляризации в сегнетоэлектриках, а также создания остаточной поляризации при воздействии на сегнетоэлектрик короткими импульсами терагерцового поля большой интенсивности.

Терагерцовое поле до 1 МВ/см создается методом оптического выпрямления в органическом кристалле короткого оптического импульса. Терагерцовый импульс с длительностью 1 пс синхронизируется с 100-фс оптическим импульсом, который сканируется вдоль терагерцового импульса и далее при помощи линии задержки. В качестве меры диэлектрической поляризации используется регистрируемая в зависимости от времени задержки τ_d интенсивность генерации второй гармоники.

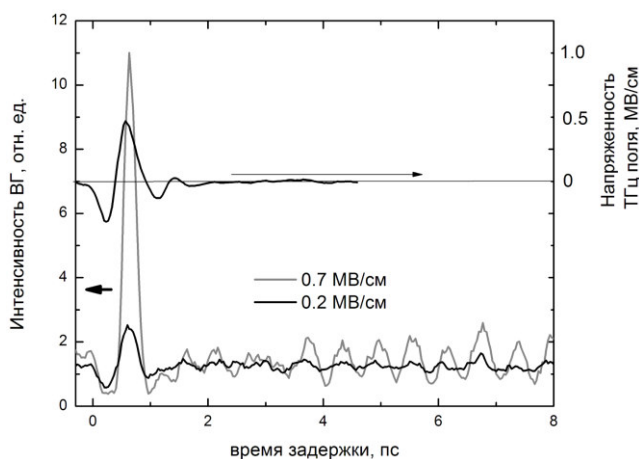


Рис. 1. Форма ТГц импульса (верхняя кривая, правая шкала) и транзитный нелинейно-оптический отклик пленки БСТ (нижние кривые, левая шкала)

На рис. 1 представлены: форма импульса возбуждающего терагерцового поля а также экспериментальные зависимости интенсивности ВГ от времени задержки для различных амплитуд поля. Из рис. 1 видно, что в пределах

действия импульса интенсивность ВГ повторяет форму задающего импульса. При $\tau_d=3.5$ пс и больших значениях ТГц поля возбуждается устойчивая колебательная мода на частоте 1.65 ТГц. При малых значениях ТГц поля характер транзитной ВГ не меняется за время измерений. Поведение транзитной зависимости при больших значениях ТГц поля мы связываем с переключением поляризации из одного устойчивого состояний в другое. Такое поведение поляризации, связанное со смещением иона, хорошо описывается в рамках нелинейного уравнения Даффина.

Таким образом, при воздействии мощного терагерцового поля на сегнетоэлектрик наблюдаются два эффекта: транзитная модуляция поляризации в пределах действия ТГц импульса и переключение поляризации после действия импульса, обеспечивающее создание остаточной поляризации на время наблюдения (до 12 пс в наших экспериментах). Отметим, что смещение ионов при воздействии коротких ТГц импульсов подтверждено в экспериментах по синхронному рентгено-структурному анализу.

Изочастотная опалесценция в сегнетоэлектриках

Горелик В.С.^{1,2}, Свербиль П.П.¹, Водчиц А.И.³, Войнов Ю.П.¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Москва, 119991, Россия (E-mail: gorelik@sci.lebedev.ru)

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

³Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной Академии Наук Беларуси,
Минск, 220072, Беларусь

Эффект изочастотной опалесценции проявляется в виде резкого возрастания спектральной интенсивности рассеянного излучения в кристаллах (LiTaO_3 , BaTiO_3 и др.) при фиксированной частоте спектрометра вблизи возбуждающей линии, при приближении к температуре фазового перехода.

В соответствии с динамической теорией фазовых переходов в кристаллах [1] в колебательном спектре должны присутствовать так называемые мягкие моды, частота которых стремится к нулю при приближении к точке фазового перехода.

Наблюдение спектра мягких мод при анализе изотемпературных зависимостей является затруднительным в связи с сильным взаимодействием между несколькими модами и релаксационным характером таких мод.

Поэтому было предложено [2,3] регистрировать так называемые изочастотные температурные зависимости спектральной интенсивности неупруго рассеянного излучения при фиксированных частотах спектрометра $\omega = \omega_L - \Omega$, вблизи частоты возбуждающего излучения ω_L .

В данной работе сообщается о результатах анализа характеристик мягких мод на основе регистрации изочастотных зависимостей спектральной интенсивности неупруго рассеянного излучения (см. рис. 1) при фиксированных частотах спектрометра, вблизи частоты возбуждающего излучения в кристаллах LiTaO_3 , BaTiO_3 , KNbO_3 . Наблюдаемый эффект позволяет идентифицировать структурные фазовые переходы в монокристаллах, а также в кристаллических порошках и получать количественную информацию о параметрах мягкой моды.

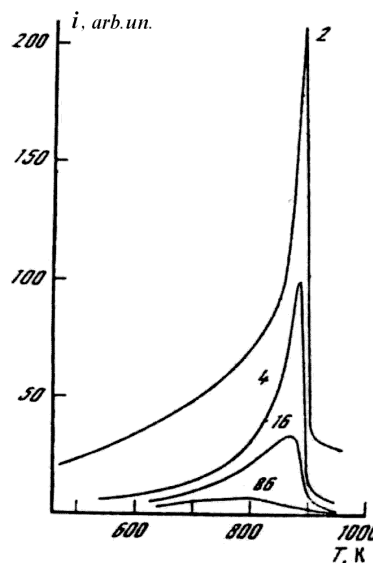


Рис. 1. Изочастотные температурные зависимости приведенной спектральной интенсивности рассеяния света в кристаллах танталата лития при геометрии рассеяния $X(ZZ)Y$ на мягкой моде вблизи точки фазового перехода при фиксированных частотах ($\Omega=86, 16, 4$ и 2 см^{-1}).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург В.Л. УФН **77**, 621 (1962).
2. Горелик В.С. Известия АН СССР, сер. физ. **49**, 282 (1985).
3. Gavshin M.G., Pastukhov V.I. Ferroelectrics **205**, 81 (1998).

Оптические гармоники вблизи поверхности сегнетоэлектрических фотонных кристаллов

Ведерников А.А.¹, Горелик В.С.^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН Москва, 119991, Россия
(E-mail: gorelik@sci.lebedev.ru)

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Сообщается об условиях наблюдения генерации второй и более высоких оптических гармоник при освещении поверхности фотонных кристаллов импульсно-периодическим лазерным излучением с высокой плотностью мощности (до 1 Твт/см^2). Приведены условия генерации оптических гармоник в приповерхностной области мезопористых трёхмерных фотонных кристаллов, существующих в виде опаловых матриц (глобулярных фотонных кристаллов), а также одномерных мезопористых фотонных кристаллов в виде анодного оксида алюминия [1-3]. В поры фотонных кристаллов вводились сегнетоэлектрические материалы: нитрит натрия, иодат калия и титанат бария. Аномальное возрастание эффективности генерации оптических гармоник наблюдалось в том случае, когда частота второй возбуждающего излучения или оптических гармоник приближалась к краю стоп-зоны фотонного кристалла. При этом реализуется аномальное возрастание плотности фотонных состояний вследствие резкого замедления групповой скорости электромагнитной волны фотонном кристалле [4,5]. Подстройка частоты возбуждающего излучения или частот оптических гармоник осуществляется за счёт поворота фотонно-кристаллической пластинки на определенный угол (см. рис.1), а также при нормальном падении лазерного излучения на поверхность фотонного кристалла путём изменения эффективного показателя преломления при нагревании фотонного кристалла.

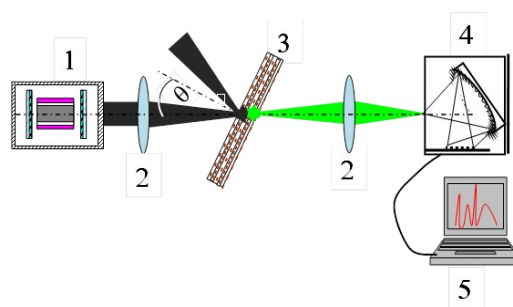


Рис. 1. Схема установки для генерации оптических гармоник вблизи поверхности мезопористого одномерного фотонного кристалла анодного оксида алюминия, поры которого заполнены сегнетоэлектрическим материалом; 1-лазер, 2-линзы, 3-фотонный кристалл, 4-спектрометр, 5-спектрометр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик В.С., Климонский С.О., Филатов В.В., Напольский К.С. Оптика и спектроскопия **120**, 562 (2016).
2. Gorelik V.S., Pudovkin A.V., Filatov V.V. Journal of Russian Laser Research **37**, 604 (2016).
3. Горелик В.С., Войнов Ю.П., Щавлев В.В., Би Дунсюэ, Shang Guo Liang, Fei Guang Tao. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 2, 73 (2017).
4. Горелик В.С., Капаев В.В. ЖЭТФ **150**, 435 (2016).
5. Горелик В.С., Злобина Л.И., Свербиль П.П., Ведерников А.А., Войнов Ю.П. Краткие сообщения по физике №3, 13 (2016).

Исследование неупругого рассеяния света и нелинейно-оптического отклика на локальных полярных неоднородностях в кристаллах ниобата бария стронция различного стехиометрического состава

**Пугачев А.М.¹, Зайцева И.В.¹, Малиновский В.К.¹, Суровцев Н.В.¹,
Ивлева Л.И.², Лыков П.А.²**

¹*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, Россия
(E-mail: apg@iae.nsk.su)*

²*Институт общей физики им. А. М. Прохорова, РАН, 119991, г. Москва, Россия*

Проведены исследования генерации второй оптической гармоники (ГВГ) и спектров комбинационного рассеяния света (КРС) на серии кристаллов ниобата бария стронция $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$ (SBN) различного стехиометрического состава ($x = 0.3, 0.5, 0.6, 0.75$), которые проявляют свойства как обычного сегнетоэлектрика ($x = 0.3$), так и релаксора ($x = 0.75$). Кристаллы были выращены в Институте общей физики им. А. М. Прохорова. Целью исследований является изучение локальных полярных неоднородностей, возникающих в параэлектрической фазе в сегнетоэлектриках с уширенным фазовым переходом [1]. В диапазоне 220 – 870 К измерены температурные зависимости сигнала второй оптической гармоники с высоким спектральным разрешением (не хуже 1 см^{-1}) при возбуждении импульсным лазерным излучением длиной волны 1064 нм, а также спектры КРС в спектральном диапазоне 8 - 200 см^{-1} при возбуждении излучением 532 нм. Обнаружено, что в высокотемпературной фазе сигнал ГВГ надежно регистрируется во всех исследуемых образцах SBN, что свидетельствует о наличии и температурной эволюции локальных нецентросимметричных неоднородностей в параэлектрической фазе. При сравнении полученных экспериментальных результатов с измерениями диэлектрической проницаемости аналогичных кристаллов [2] показано, что анализ производной по температуре сигнала второй гармоники, предложенный в [3], достоверно описывает параметры фазового перехода из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу. Экспериментально показано, что во всех исследованных кристаллах SBN как в сегнетоэлектрической, так и в параэлектрической фазах, спектральная ширина отклика на удвоенной частоте возбуждающего импульсного излучения неизменна и не превышает спектрального разрешения прибора ($\sim 1 \text{ см}^{-1}$). Это свидетельствует о том, что времена жизни локальных областей, обуславливающих нелинейный отклик (дополнительных вкладов, сравнимых по интегральной интенсивности с сигналом ГВГ, не обнаружено), находятся в диапазоне не ниже 5 ps. В работе обсуждается зависимость формы центрального пика в спектрах КРС от стехиометрического состава кристалла SBN. В частности показано, что, в отличие от обычного сегнетоэлектрика, где ширина центрального пика в представлении спектральной плотности определяется одним временем релаксации, в сегнетоэлектриках с уширенным фазовым переходом ($x > 0.6$) - множеством времен релаксации, средняя величина которых не превышает 0.5 ps.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-02-04950.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Burns, B.A. Scott. Solid State Comm. **13**, 423 (1973).
2. T. Lukasiewicz, M.A. Swirkowicz, J. Dec *et.al* Journal of Crystal Growth **310**, 1464 (2008).
3. A. M. Pugachev, I. V. Zaytseva, V. I. Kovalevskii *et.al*. Ferroelectrics, **501**, 9-14 (2016).

Исследование фазовых переходов в кристаллах мультиферроиков со структурой хантита методом КР

**Крылов А.С., Мошкина Е.М., Софронова С.Н., Гудим И.А.,
Темеров В.Л., Крылова С.Н., Втюрин А.Н.**

*Институт физики им. Л.В. Куренского ФИЦ КНЦ СО РАН Красноярск, 660036, Россия
(E-mail: shusy@ru)*

Кристаллы семейства $RFe_3(BO_3)_4$ (где R редкоземельный ион) обладают свойствами мультиферроиков, демонстрируя как структурные так и магнитные фазовые переходы [1–3]. Температуры фазовых переходов могут быть изменены добавлением в состав редкоземельных элементов. В данной работе мы использовали спектроскопию комбинационного рассеяния света для изучения поведения и свойств монокристаллов и твердых растворов кристаллов $(Ho-Nd)Fe_3(BO_3)_4$, $(Sm-La)Fe(BO_3)_4$ и $HoGa_3(BO_3)_4$.

Низкотемпературные исследования проводились в диапазоне температур 10–400 К. Исследования при высоких гидростатических давлениях и высоких температурах проводились при давлении до 7 ГПа и температурах до 680 К с помощью ячейки с алмазными наковальнями.

В данной работе изучались мягкие моды, связанные с параметрами структурного порядка и эффектами магнитного упорядочения при фазовых переходах в спектрах комбинационного рассеяния света. Выполнено построение фазовой р-Т диаграммы. [4]

В Nd-легированных кристаллах наблюдалось изменение спектров, индуцированное магнитным упорядочением ниже температуры Нееля (около 40 К), включающее магнетонное рассеяние. Анализ колебательных спектров и их численное моделирование показывают, что большие смещения ионов кислорода в BO_3 группах ниже температуры Нееля, приводят к более сильным магнитоупругим взаимодействиям.

В твердых растворах Sm-La обнаружены аномалии, при температурах около $T_N = 32$ К, соответствующие температурам магнитных фазовых переходов [5]. Было установлено, что основные изменения наблюдаются в низкочастотном диапазоне спектра, соответствующего двухмагнетонному рассеянию. (Рис. 1) и имеют внутреннюю структуру.

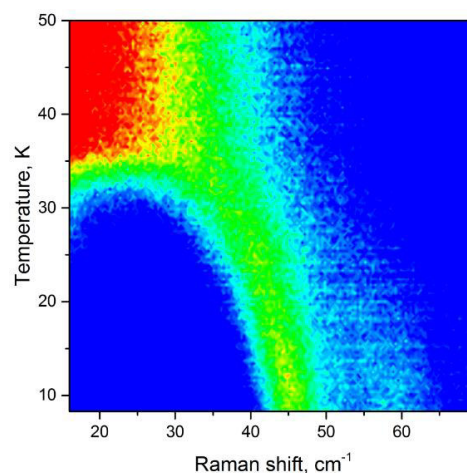


Рис. 1. Температурная зависимость спектров КР в кристалле $Sm_{0.25}La_{0.75}Fe_3(BO_3)_4$

ЛИТЕРАТУРА

1. Zvezdin A.K., Krotov S.S., Kadomtseva A.M. et al. JETP Lett. **81**, 272 (2005).
2. Fausti D., Nugroho A.N., Paul H.M. van Loosdrecht Phys. Rev. B **74**, 024403 (2006).
3. Krylov A.S., Sofronova S.N., Gudim I.A. et al. Solid State Commun. **174**, 26 (2013).
4. Krylov, A. S., Gudim, I. A., Nemtsev, I., Krylova, S. N., Shabanov, A. V., Krylov, A. A. J. Raman Spectrosc., doi: 10.1002/jrs.5078. (2017).
5. E. Moshkina, A. Krylov, S. Sofronova, I. Gudim, V. Temerov, Cryst. Growth Des., **16**, 6915 (2016).

Понижение симметрии «кубических» центров Mn^{4+} и Fe^{3+} в тонких пластинках $SrTiO_3$: эффект локальный или макроскопический?

**Юсупов Р.В.¹, Габбасов Б.Ф.¹, Зверев Д.Г.¹, Киямов А.Г.¹,
Никитин С.И.¹, Трепаков В.А.^{2,3}, Jastrabik L.³, Dejneka A.³**

¹Казанский федеральный университет, Казань, 420008, Россия
(E-mail: Roman.Yusupov@kpfu.ru)

²Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург, 194021, Россия

³Institute of Physics AS CR, Na Slovance 2, 182 21 Prague 8, Czech Republic

Квантовый параэлектрик титанат стронция $SrTiO_3$ (STO) является хорошо изученным модельным представителем семейства высокополяризуемых ABO_3 перовскитов. При $T_c \sim 105$ К он испытывает структурный $O_h^1 \rightarrow D_{4h}^{18}$ антиферродисторсионный фазовый переход в тетрагональную фазу. Являясь популярным объектом академических фундаментальных исследований и проявляя большое разнообразие эффектов при внешних воздействиях, легировании и т.д., STO является практически значимым материалом широкого спектра применений как нелинейный диэлектрик и в качестве подложек эпитаксиальных тонких пленок и разнообразных гетероструктур.

В докладе будут представлены результаты обнаружения и исследований по спектрам ЭПР примесных кубических центров ионов Fe^{3+} и Mn^{4+} понижения симметрии кристаллической структуры миллиметровых параллелепипедов и пластинок STO при температурах значительно выше T_c . В работе использовались высококачественные монокристаллы STO, выращенные методом Вернейля в Fujiuchi Chemical Corporation (Япония). Обнаружено, что уже при комнатной температуре в спектрах ЭПР центров Mn^{4+} и Fe^{3+} в пластинках с базовыми плоскостями (001) или (110) толщиной ~ 0.5 мм наблюдаются аксиальные искажения, сопоставимые по величине с наблюдаемыми при 4.2 К в тетрагональной фазе. Характер искажений отличается от наблюдаемого ниже $T_c = 105$ К. Величина аксиальной деформации систематически зависит от геометрии образцов, соотношения размеров и качества обработки поверхностей. При идентичном качестве обработки больших граней пластинок спектры ЭПР ионов Fe^{3+} в ориентациях [001], [100] и [010] имеют выраженную тонкую структуру с малой неоднородной шириной компонент. Следовательно, деформация структуры практически однородна по объему за исключением, возможно, тонкой приповерхностной области. При различном качестве обработки наблюдается градиент деформации, проявляющийся в уширении компонент спектра. При заданном качестве обработки оснований уменьшение толщины пластинок приводит к увеличению деформации. Значение параметра аксиальности D спин-гамилтониана для ионов Mn^{4+} при этом обратно пропорционально толщине пластинки h .

Возможным источником наблюдаемого понижения симметрии, которое, на наш взгляд, происходит во всем макроскопическом образце, может быть скрытая структурная нестабильность и соответствующее понижение симметрии, индуцированное поверхностью и поверхностными дефектами [1]. При этом, по данным электрополевого эффекта в спектрах ЭПР ионов Mn^{4+} , кристаллографическая симметрия исследованных образцов является аксиальной неполярной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леванюк А.П., Минюков С.А. ФТТ **25**, 2617 (1983).

Комбинационное рассеяние света при магнитном фазовом переходе в пленках феррита висмута легированного неодимом

Кхабири Г.^{1,2}, Разумная А.Г.², Горьковая Е.Д.², Анохин А.С.³,
Мухортов В.М.³

¹Fayoum university, Fayoum, Egypt

²Южный федеральный университет

Ростов-на-Дону, 344006, Россия (E-mail: razumnaya2@yandex.ru)

³Южный научный центр РАН Ростов-на-Дону, 344006, Россия

В работе исследованы двухслойные эпитаксиальные гетероструктуры $(\text{Bi}_{0.98}\text{Nd}_{0.02})\text{FeO}_3/(\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2})\text{TiO}_3$ (BNFO/BST), выращенные методом ВЧ-распыления на кубических подложках MgO с ориентацией (001) и (111). Исследования морфологии поверхности показали, что пленка BNFO/BST/(001)MgO сформировалась по блочному механизму роста, шероховатость пленки составляла ~ 8.3 нм, толщины слоев BNFO и BST составляли ~ 80 нм. Шероховатость поверхности пленки BNFO/BST/(111)MgO составляла ~ 14 нм, толщины слоев BNFO и BST составляли ~ 200 нм.

Для определения особенностей динамики решетки гетероструктуры BNFO/BST были изучены методом спектроскопии КРС в широком температурном интервале 295 – 1100 К. При комнатной температуре спектры КРС гетероструктур BNFO/BST/(111) и BNFO/BST/(001) MgO в низкочастотной области (ниже 600 см^{-1}) схожи со спектром объемного монокристалла. На частоте $\sim 620 \text{ см}^{-1}$ в спектрах пленок наблюдается интенсивная полоса, соответствующая максимуму плотности состояний магнетонной ветви на границе зоны Бриллюэна, и интенсивная полоса в спектрах второго порядка с максимумом $\sim 1264 \text{ см}^{-1}$, соответствующая плотности состояний двухмагнетонных возбуждений. Эта двухмагнетонная полоса наблюдается вплоть до 900 К, причем ее интенсивность с ростом температуры уменьшается в 8-10 раз при приближении к $T_N=643$ К. Частота этой линии незначительно уменьшается с повышением температуры, а ее полуширина увеличивается. Таким образом, такая температурная зависимость двухмагнетонного рассеяния в спектрах КРС гетероструктур BNFO/BST/(111) и BNFO/BST/(001) MgO указывает на существование корреляции спинов выше температуры антиферромагнитного перехода.

На основании проведенных исследований спектров КРС гетероструктур BNFO/BST/(111) и BNFO/BST/(001) MgO можно сделать вывод о стабильности антиферромагнитного упорядочения в данных гетероструктурах. Ориентация подложки, толщина пленки BNFO, размеры ростовых блоков и наличие промежуточных слоев BST между подложкой и пленкой BNFO практически не влияют на температуру антиферромагнитного перехода, что согласуется с результатами предыдущих исследований пленок BFO [1].

Работа проводилась при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-32-00033 мол_а) и стипендии Президента РФ (СП-1359.2016.3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Infante I.C., Lisenkov S., Dupé B., Bibes M., Fusil S., Jacquet E., Greneste G., Petit S., Courtial A., Juraszek J., Bellaiche L., Barthélémy A., Dkhil B. Phys. Rev. Lett. **105**, 057601 (2010).

Оптические свойства и структурная однородность монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{V}$

**Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Яничев А.А., Титов Р.А.,
Теплякова Н.А., Макарова О.В.**

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН Апатиты, 184209, Россия (E-mail: sidorov@chemy.kolasc.net.ru)

Для решения задач преобразования излучения и управления характеристиками преобразованного излучения актуально получение высокосовершенных оптических материалов на основе нелинейно-оптического кристалла LiNbO_3 с предельно низким эффектом фоторефракции. Обычно снижения фоторефракции добиваются путем легирования конгруэнтного кристалла “нефоторефрактивными” катионами металлов (Zn^{2+} , Mg^{2+} и др.), которые хорошо входят в кислородные октаэдры структуры. Такое легирование приводит, прежде всего, к вытеснению легирующими катионами основных дефектов катионной подрешетки Nb_{Li} . Однако легирование в значительных концентрациях приводит к повышению оптической и структурной неоднородности кристалла. Неметаллические катионы практически не входят в кислородные октаэдры структуры кристалла LiNbO_3 . По этой причине практически нет публикаций, посвященных исследованию влияния легирования неметаллическими катионами на структуру и физические характеристики кристаллов LiNbO_3 [1,2]. Однако, неметаллические катионы могут оказывать заметное влияние на структуру расплава, его физико-химические свойства, условия кристаллизации, а, следовательно, на характеристики и особенно вторичную структуру выращенного кристалла LiNbO_3 .

В докладе представлены результаты исследований по спектрам КРС изменения вторичной структуры кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{V}$ (0.55÷1.24 мол. % в шихте), а также стехиометрических и конгруэнтных кристаллов. Оптическая и структурная однородность кристаллов исследована методами фотоиндуцированного рассеяния света, лазерной коноскопии, измерением края фундаментального оптического поглощения. Катионы V^{3+} отличаются крайне низким коэффициентом вхождения в структуру LiNbO_3 ($K_p \ll 1$). При содержании около 1.2 мол. % V_2O_5 в расплаве, в кристалле будет присутствовать всего лишь $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ мол. % V_2O_5 , что соответствует концентрации посторонних следовых катионных примесей. Однако при изменении состава шихты в кристалле изменяется эффект фоторефракции и наблюдаются изменения во всем спектре КРС, что свидетельствует об изменении в кристалле порядка чередования основных, легирующих катионов и вакансий вдоль полярной оси и о «возмущении» кислородных октаэдров. Таким образом, структурируя расплав, примесь бора уменьшает количество дефектов Nb_{Li} и снижает, тем самым, эффект фоторефракции в монокристалле, повышая его структурную однородность. О низком эффекте фоторефракции и высоком качестве монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{V}$ свидетельствует также двулучепреломление при распространении лазерного луча перпендикулярно полярной оси Z . В кристаллах LiNbO_3 с более высоким эффектом фоторефракции двулучепреломление «замазано» эффектами разупорядочения и фоторефракцией, поэтому визуально не проявляется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Яничев А.А., Титов Р.А., Теплякова Н.А. Оптика и спектроскопия **121**, № 1, 40 (2016).
2. Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Яничев А.А., Титов Р.А., Теплякова Н.А. Журнал прикладной спектроскопии **83**, № 5, 707 (2016).

Прямые доказательства скрытой структурной нестабильности кубических фтороперовскитов ABF_3

Писарев Р.В., Дубровин Р.М., Кижяев С.А., Сырников П.П.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН 194021 С. Петербург, Россия
(E-mail: pisarev@mail.ioffe.ru)

Поиск новых мультиферроиков с эффективными восприимчивостями является важной задачей современной физики конденсированного состояния. Недавно появились сообщения о возможности создания мультиферроиков на основе фтороперовскитов $A^{1+}B^{2+}F_3$ [1]. С целью более глубокого понимания причин структурной стабильности или нестабильности ABF_3 перовскитов с магнитными и немагнитными В-ионами, мы провели цикл исследований температурных зависимостей диэлектрической проницаемости $\epsilon(T)$ в диапазоне от 4 до 350 К при частотах 10 - 1000 кГц. Впервые были исследованы двенадцать соединений со значениями толеранс-факторов от $t=0.81$ до 1.03.

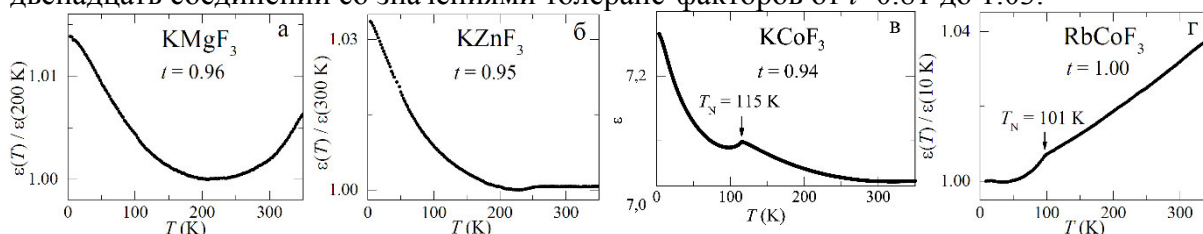


Рис. 1. Температурные зависимости $\epsilon(T)$ в (а) $KMgF_3$, (б) $KZnF_3$, (в) $KCoF_3$, и (г) $RbCoF_3$.

На Рис. 1 (а, б) показаны температурные зависимости диэлектрической проницаемости для двух диамагнитных кристаллов $KZnF_3$ и $KMgF_3$, в которых $\epsilon(T)$ растет при низких температурах без признаков насыщения. На Рис. 1 (в, г) показаны зависимости $\epsilon(T)$ для кристаллов $KCoF_3$ и $RbCoF_3$, в которых ниже T_N происходит антиферромагнитное упорядочение. Температурные зависимости $\epsilon(T)$ в них совершенно различные, хотя по своим магнитным, оптическим и другим физическим свойствам эти два кристалла являются почти идентичными. В $KCoF_3$ в области низких температур наблюдается рост $\epsilon(T)$ без признаков насыщения, аналогичный такому же росту в диамагнитных $KZnF_3$ и $KMgF_3$, что свидетельствует об их *структурной неустойчивости*. В $RbCoF_3$ имеет место типичное монотонное падение $\epsilon(T)$ при понижении температуры. В обоих кристаллах ниже T_N четко проявляется спонтанный магнитодиэлектрический эффект.

Анализ температурных зависимостей $\epsilon(T)$ в изученных двенадцати перовскитах позволил нам сделать следующие выводы: 1. Имеет место четкая корреляция между низкотемпературным и высокотемпературным поведением $\epsilon(T)$ в зависимости от конкретного значения толеранс-фактора t . 2. Рост $\epsilon(T)$ при понижении температуры наблюдался в магнитных и немагнитных кубических фтороперовскитах при значениях t в диапазоне 0.94-0.96, что, по нашему убеждению, свидетельствует об их скрытой структурной нестабильности. 3. В случае кристаллов со значениями толеранс-фактора ниже или выше этих значений, а именно орторомбических $NaCoF_3$ ($t=0.81$) и $NaNiF_3$ ($t=0.82$), а также для $RbFeF_3$ ($t=0.99$) и $RbCoF_3$ ($t=1.00$) с высокими значениями t , при понижении температуры от 350 К до 4 К имеет место монотонное уменьшение $\epsilon(T)$ с выходом на постоянные значения, что свидетельствует об их *структурной стабильности*.

Работа выполнялась при поддержке проекта РНФ №16-12-10456.

ЛИТЕРАТУРА

1. Garcia-Castro A.C., Romero A.H., Bousquet E., Phys. Rev. Lett. **116**, 117202 (2016).

Магнитоэлектрический эффект в шпинелях

**Тер-Оганесян Н.В.¹, Saha R.², Ghara S.², Jang D.H.³, Kim K.H.³,
Sundaresan A.²**

¹НИИ физики, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090, Россия
(E-mail: nikita.teroganessian@gmail.com)

²Jawaharlal Nehru Centre for Advanced Scientific Research, Bangalore, 560064, India

³Seoul National University, Seoul 151-747, Republic of Korea

Кристаллический класс шпинелей с общей химической формулой AB_2X_4 , где $X=O, S, Se$ или Te , а A и B – металлы, является одним из наиболее богатых структурных классов. Шпинели часто демонстрируют высокие температуры (до 1000 К) магнитных фазовых переходов, а также предоставляют широкие возможности как для катионного, так и для анионного замещения. Все это делает шпинели перспективными материалами с точки зрения поиска новых материалов и модифицирования их свойств.

Сегнетоэлектрические явления в шпинелях, однако, практически не наблюдаются, а магнитоэлектричество, несмотря на разнообразие магнитных свойств, обнаружено лишь в небольшом количестве соединений. В данной работе показано, что некоторые подклассы класса шпинелей являются магнитоэлектриками. Во-первых, это катион-упорядоченные магнитные шпинели с общей химической формулой $A'_{1/2}A''_{1/2}B_2X_4$, в которых 1:1 упорядочение катионов A' и A'' должно во многих случаях приводить к возникновению магнитоэлектрических свойств [1]. Во-вторых, это AB_2X_4 шпинели с антиферромагнитным упорядочением в A -подрешетке. Нами экспериментально и теоретически показано возникновение линейного магнитоэлектрического эффекта ниже температуры Нееля в антиферромагнетиках Co_3O_4 , $MnGa_2O_4$ и $MnAl_2O_4$ [2]. Кроме того, обнаружение линейного магнитоэлектрического эффекта ниже температуры возникновения магнитного порядка в шпинели $CoAl_2O_4$ со значительной фрустрацией спинов в подрешетке Co позволяет сделать важные выводы об основном магнитном состоянии и его зависимости от степени инверсии $Co-Al$ [3].

Работа выполнена в рамках базовой части госзадания № 3.5710.2017/БЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ter-Oganessian N.V., J. Magn. Magn. Mater. **364**, 47 (2014).
2. Saha R., Ghara S., Suard E., Jang D.H., Kim K.H., Ter-Oganessian N.V., Sundaresan A., Phys. Rev. B **94**, 014428 (2016).
3. Ghara S., Ter-Oganessian N.V., Sundaresan A., Phys. Rev. B (2017), accepted.

Исследование магнитоэлектрических и магнитоупругих свойств монокристаллов оксиборатов

Дубровский А.А., Фрейдман А.Л., Балаев А.Д., Еремин Е.В.,
Гудим И.А., Темеров В.Л.

*ИФ СО РАН им. Л.В. Киренского, Академгородок 50, стр. 38, Красноярск 660036,
Россия*

Магнитоэлектрический эффект, отражающий взаимодействие между магнитным порядком, обусловленным наличием нескомпенсированного спинового магнитного момента иона, и электрической поляризацией, обусловленной зарядами ионов, привлекает внимание исследователей уже более века. Однако механизм, отвечающий за магнитоэлектрический эффект на микроскопическом уровне, остается невыясненным до конца. Материалы, в которых наблюдается магнитоэлектрический эффект, показывают сильную зависимость поляризации от приложенного магнитного поля (так называемый прямой магнитоэлектрический эффект – ME_H), либо изменение намагниченности при приложенном электрическом поле (так называемый обратный магнитоэлектрический эффект – ME_E).

Среди веществ, в которых наблюдается магнитоэлектрический эффект, выделяется семейство боратов $RM_3(BO_3)_4$, где R – редкоземельный ион, а M – ион Al, Fe, Ga, Sc, Cr. Данные вещества имеют пространственную группу $R32$, что определяет отсутствие центра инверсии. Поскольку в данных соединениях присутствуют магнитные 3d или 4f ионы, это приводит к различным магнитным взаимодействиям, в том числе к мультиферроизму. Кристаллическая структура семейства боратов сильно анизотропна. Подрешетка M-атомов образует геликоидальную цепочку вдоль c-оси, образованную M^{3+} ионами, в то время как ионы редкоземельного металла R изолированы друг от друга, образуя призмы RO_6 , без взаимодействия типа R–O–R.

В работе [1] в кристалле $HoAl_3(BO_3)_4$ был открыт прямой гигантский магнитоэлектрический эффект. Обращает на себя внимание тот факт, что данный материал не является мультиферроиком в общепринятом смысле, так как не является магнитоупорядоченным веществом. Также в цитируемой работе наблюдалась магнитострикция данного кристалла. Авторы не дали каких-либо объяснений касательно наблюдаемых явлений.

В данной работе мы приводим исследование обратного магнитоэлектрического эффекта и диэлектрической проницаемости в кристалле $HoAl_3(BO_3)_4$ для выявления микроскопического механизма, отвечающего за наличие данного эффекта. Также с целью выявить связь между 4f и 3d подсистемами в данном семействе кристаллов (в зависимости от их типа меняется кристаллическое поле) и для проверки данной микроскопической модели нами были исследованы прямой магнитоэлектрический эффект и магнитострикция семейства кристаллов $RM_3(BO_3)_4$, где R – Sm, La, Ho, Tb, а M – ион Al, Fe, Ga и их комбинации.

ЛИТЕРАТУРА

1. K.-C. Liang, R. P. Chaudhury, B. Lorenz, et al., Phys. Rev. B 83, 180417(R) (2011).

Электрическая поляризация, индуцированная фазовым расслоением в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях RMn_2O_5 ($\text{R} = \text{Gd}$ и Bi)

Ханнанов Б.Х.¹, Санина В.А.¹, Головенчиц Е.И.¹, Щеглов М.П.¹

¹ *Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург, 194021, Россия (E-mail: boris.khannanov@gmail.com)*

Петли гистерезиса электрической поляризации были обнаружены в мультиферроиках RMn_2O_5 ($\text{R} = \text{Gd}, \text{Bi}$) в широком интервале температур от 5К до 330К [1]. Ранее сегнетоэлектрический дальний порядок, имеющий обменно-стрикционную магнитную природу, наблюдался в RMn_2O_5 ниже температуры магнитного упорядочения ($T_N=35-40$ К). Нами было установлено, что наблюдаемая поляризация обусловлена замороженным суперпараэлектрическим состоянием, которое формируется динамически равновесными локальными полярными областями фазового расслоения. Такие области возникают из-за наличия в структуре RMn_2O_5 соседних ионов марганца с различными валентностями (Mn^{3+} и Mn^{4+}), между которыми возможен перенос делокализованного e_g электрона ионов Mn^{3+} . В результате области фазового расслоения формируются за счет процессов самоорганизации носителей заряда. Полярность областей фазового расслоения возникает из-за перераспределения ионов с разной валентностью между центральными и нецентральными локальными позициями. В то время как в исходной матрице распределение ионов между этими позициями приводит к центросимметричности (пр. гр. P6am). При некоторых достаточно высоких температурах в парамагнитной области (100 – 330 К) замороженное суперпараэлектрическое состояние превращается в обычное суперпараэлектрическое состояние, в котором отсутствуют петли гистерезиса. Это происходит, когда высота энергетических барьеров на границах областей фазового расслоения сравнивается с кинетической энергией электронов сквозной проводимости (утечки). Петли электрической поляризации измерялись импульсным так называемым PUND методом, который позволял корректно исключить вклад проводимости в петли гистерезиса. Независимыми методами изучались свойства областей фазового расслоения (диэлектрическими и структурными) и обнаруженной поляризации. Наблюдались корреляции в свойствах областей фазового расслоения и поляризации. Обнаруженная нами высокотемпературная поляризация также была магнитной природы и управлялась магнитным полем, так как двойной обмен является ключевым взаимодействием, ответственным за фазовое расслоение. Отметим, что недавно появилась синхротронная рентгеновская структурная работа [2], в которой в целом ряде RMn_2O_5 с различными R ионами наряду с интенсивными рефlekсами, соответствующими пр.гр. P6am , наблюдались также слабоинтенсивные рефlekсы, не описываемые этой центросимметричной группой. Авторы [2] считали, что весь однородный кристалл обладает нецентральной симметрией Pm . Нам же удалось обнаружить лишь локальные полярные области фазового расслоения. Структурного перехода и аномалий, характерных для сегнетоэлектрического перехода не было обнаружено.

ЛИТЕРАТУРА

1. B.Kh. Khannanov, V.A.Sanina, E.I.Golovenchits, M.P.Scheglov *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **421**, 326–335 (2017).
2. V. Baledent, S. Chattopadhyay, P. Fertey *et.al.* Evidence for room temperature electric polarization in RMn_2O_5 , *Phys. Rev. Lett.* **114**, 117601 (2015).

Кристаллическая структура и диэлектрические отклики твердых растворов системы $(0.95-x)\text{BiFeO}_3-0.05\text{PbTiO}_3-x\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$

Глазунова Е.В.¹, Болдырев Н.А.¹, Шилкина Л.А.¹, Резниченко Л.А.¹

¹Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета
Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: kate93g@mail.ru)

В последнее время сильно возрос интерес к мультиферроикам – веществам, в которых проявляется взаимодействие магнитной и электрической подсистем. Одним из наиболее исследованных представителей данного класса материалов является феррит висмута (BiFeO_3 , BFO) со структурой типа перовскита. Однако, критическая зависимость фазового состава и характеристик от условий получения, а также высокая электропроводность ограничивает широкое использование BiFeO_3 . С целью устранения этих негативных факторов BFO зачастую используют в качестве базового компонента твердых растворов (ТР) [1]. В данной работе объектом исследования стали ТР тройной системы $(0.95-x)\text{BiFeO}_3-0.05\text{PbTiO}_3-x\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$, где $0.175 \leq x \leq 0.325$, $\Delta x=0.025$. Исследуемые ТР были изготовлены по обычной керамической технологии обжигом в две стадии, с промежуточным помолом, при температурах $T_1 = 1093$ К, $T_2 = 1143$ К и временах выдержки $\tau_1 = 8$ час., $\tau_2 = 10$ час., соответственно. Спекание осуществляли при $T_{\text{сп}} = 1273$ К в течение $\tau_{\text{сп}} = 2$ час. Рентгенофазовый анализ показал, что все образцы имеют структуру перовскита и не содержат посторонних фаз, за исключением ТР с $x=0.275$, в котором содержится небольшое количество примесной фазы, предположительно PbNb_2O_6 . Все ТР имеют ромбоэдрическую (Рэ) перовскитовую ячейку. В ТР с $x=0.175$ и $x=0.200$ сохраняется пространственная группа феррита висмута R3c, а в интервале $0.200 < x < 0.225$ происходит фазовый переход R3c→R3m. Изменения параметров ячеек показаны на рис. 1. На рис. 2 представлены зависимости действительной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости от температуры. В работе обсуждается влияние кристаллической структуры и фазового состава на диэлектрические характеристики исследуемых объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования ЦКП «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики ЮФУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдырев Н.А., Павленко А.В., Шилкина Л.А., Резниченко Л.А., Миллер А.И., Изв. РАН Сер. Физ. 80, 804 (2016).

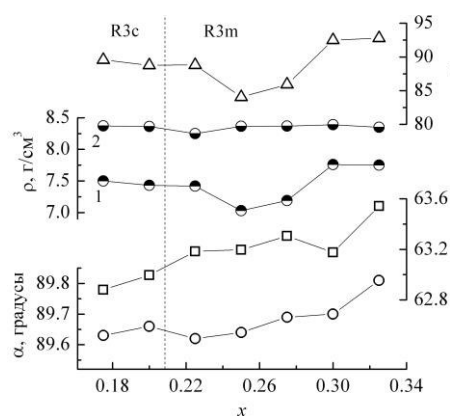


Рис. 1. Параметры элементарных ячеек исследуемых ТР.

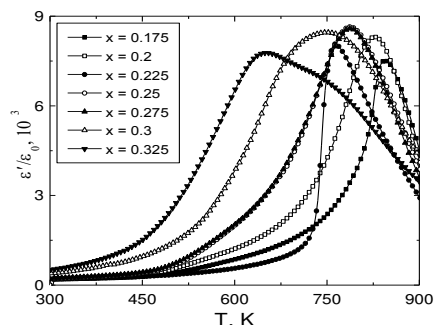


Рис. 2. Температурные зависимости ϵ'/ϵ_0 исследуемых ТР на частоте 1 МГц.

Структура и диэлектрический отклик потенциальных сегнетоэлектриков со структурой гексаферрита М-типа

**Михейкин А.С.^{1,2}, Торгашев В.И.², Горшунев Б.П.^{3,4}, Буш А.А.⁵,
Разумная А.Г.²**

¹ Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, 344006, Россия
(E-mail: aleksey.mikheykin@gmail.com)

² Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

³ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700, Россия

⁴ Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия

⁵ Московский технологический университет, Москва, 119454, Россия

Соединения с общей формулой $AFe_{12}O_{19}$ ($A = Ba, Sr, Pb$) образуют большой класс ферримагнитных оксидов, называемых гексаферритами М-типа; структурно они изоморфны минералу магнетопломбиту. Искусственный магнетопломбит, $Pb^{2+}Fe_{12}^{3+}O_{19}$, одна из нескольких ферритных фаз, используемых при производстве постоянных магнитов. Разбавленный образец $BaFe_{1-x-y}Sc_xMg_yO_{19}$ ($y=0.05$) с $x = 1,6$ и $1,75$ обладает свойствами мультиферроика [1]. Опубликовано сообщение о наличии большой остаточной поляризации $104 \mu C/cm^2$ в $PbFe_{12}O_{19}$ [2]. При этом $BaFe_{12}O_{19}$ и $SrFe_{12}O_{19}$ являются квантовыми параэлектриками [3].

Кристаллохимически во многих соединениях свинец ведет себя аномально, так как катион Pb^{2+} обладает неподеленной парой электронов $6s^2 Pb^{2+}$ в отличие от бариевого аналога. В этом контексте можно ожидать и отличной от $BaFe_{12}O_{19}$ динамики фононной моды в $PbFe_{12}O_{19}$ с участием $Fe(2b)$ и $Pb(2d)$.

Кристаллы $PbFe_{12}O_{19}$, выращенные методом раствор-расплавной кристаллизации, были исследованы методом дифракции синхротронного излучения (SNBL at ESRF) и терагерцовой спектроскопии с временным разрешением (Terahertz time-domain spectroscopy TDS). По данным монокристаллической дифракции синхротронного излучения, структура гексаферрита имеет гексагональную решетку с параметрами $a = 5,8971(1)$, $c = 23,3563(4)$ и принадлежит пространственной группе симметрии $R\bar{3}m$. Модель содержит две расщепленные позиции: $Fe(2)$ в бипирамидальном окружении ионов кислорода $(2b)(0, 0, 1/4) \rightarrow (1/2 \times 4e)(0, 0, z)$ и $Pb(2d) (2/3, 1/3, 1/4) \rightarrow (24l)(x, y, z)$. Эллипсоиды атомных смещений ионов кислорода, окружающих ион свинца, вытянуты по направлению к нему в плоскости, перпендикулярной гексагональной оси c .

В спектрах TDS вблизи $\sim 1,2$ ТГц присутствует широкая линия поглощения, которая отнесена к сильно демпфированному фононному отклику с участием в моде тяжелых катионов свинца и железа, дающих основной вклад в плотность фононных состояний на низких частотах. Тщательный анализ этой спектральной области показал, что основные изменения в спектре обусловлены вкладом от сквозной проводимости Друде. Этот вклад практически отсутствует ниже температуры $T \approx 130$ К, что может быть обусловлено наличием фазового перехода типа «порядок-беспорядок» при упорядочении в подрешетках $Fe(2b)$ и Pb .

ЛИТЕРАТУРА

1. Y. Tokunaga, Y. Kaneko, D. Okuyama, et al., PRL **105**, 257201 (2010).
2. Guo-Long Tan and Wei Li, J. Am. Ceram. Soc. **98**, 1812 (2015).
3. S.E. Rowley, Yi-Sheng Chai, Shi-Peng Shen et al., Scientific Reports **6**, 25724 (2016).

Нестехиометрия твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$

Рудская А.Г., Куприянов М.Ф.

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090, Россия
(E-mail: arudskaya@yandex.ru)*

В докладе обсуждаются особенности создания нестехиометрических составов $\text{La}_{1-x}\square_x\text{Mn}^{3+}_{1-y}\text{Mn}^{4+}_y\text{O}_{3-z}$, в которых могут формироваться кристаллические фазы с ионами Mn^{3+} и Mn^{4+} в разных концентрациях, в зависимости от исходного состава, вида прекурсоров, а также от температур, времен, атмосферы отжига, то есть от термодинамической предыстории, которая определяет виды и концентрации дефектов. Свойства таких нестехиометрических составов подобны свойствам твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ (A – Ca, Sr или Ba) нестехиометрических составов.

В докладе будут приведены способы экспериментальных и теоретических оценок содержания ионов Mn^{3+} и Mn^{4+} в твердых растворах $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$.

Составы $\text{La}_{1-x}\square_x\text{Mn}^{3+}_{1-y}\text{Mn}^{4+}_y\text{O}_3$ предполагают, что в позиции А имеется вакансия по ионам La. В твердых растворах происходит частичная компенсация дефицита заряда в позиции А, путем введения одно- ($\text{K}^-, \text{Na}^-, \text{Ag}^-$) или двух- ($\text{Ca}^{2+}, \text{Cd}^{2+}, \text{Ba}^{2+}, \text{Pb}^{2+}$) валентных ионов. В твердых растворах $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ происходит частичная компенсация дефицита заряда в позиции А.

Для составов $(\text{La}_{0.875}\text{Ca}_{0.125})_{1-x}\text{Mn}^{3+}_{1-y}\text{Mn}^{4+}_y\text{O}_{3-z}$ эксперимент позволяет по соотношению интегральных интенсивностей гомологических пар дифракционных отражений найти x и y. Например, для соотношения $I_{200}/I_{111} = 2.30$ (точность определения соотношения $\pm 2\%$) получаем, что $x(\text{La}_{0.875}\text{Ca}_{0.125}) = 0.07$, с учетом электронейтральности $-y(\text{Mn}^{4+}) = 0.07$. По теоретической зависимости температуры перехода Ян-Теллера от концентрации ионов Mn^{4+} , получаем, что $y(\text{Mn}^{4+}) = 0.06 \dots 0.08$. Уточненная химическая формула исследуемого состава – $\text{La}^{3+}_{0.81}\text{Ca}^{2+}_{0.12}\square_{0.07}\text{Mn}^{3+}_{0.93}\text{Mn}^{4+}_{0.07}\text{O}_{2.87}$.

Для состава $(\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})_{1-x}\text{Mn}^{3+}_{1-y}\text{Mn}^{4+}_y\text{O}_{3-z}$ экспериментальное соотношение $I_{200}/I_{111} = 2.40$, что соответствует нестехиометрии $(\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7})_{1-x}\text{Mn}^{3+}_{1-y}\text{Mn}^{4+}_y\text{O}_{3-z}$ с $x = y = 0.125$ и для состава $(\text{La}_{0.5}\text{Ca}_{0.5})_{1-x}\text{Mn}^{3+}_{1-y}\text{Mn}^{4+}_y\text{O}_{3-z}$ экспериментальное соотношение $I_{200}/I_{111} = 2.48$, что соответствует нестехиометрии $(\text{La}_{0.5}\text{Ca}_{0.5})_{1-x}\text{Mn}^{3+}_{1-y}\text{Mn}^{4+}_y\text{O}_{3-z}$ с $x = y = 0.135$. Тогда уточненные химические формулы исследованных составов твердых растворов имеют вид $\text{La}^{3+}_{0.61}\text{Ca}^{2+}_{0.26}\square_{0.13}\text{Mn}^{3+}_{0.88}\text{Mn}^{4+}_{0.12}\text{O}_{2.76}$ и $\text{La}^{3+}_{0.43}\text{Ca}^{2+}_{0.43}\square_{0.14}\text{Mn}^{3+}_{0.87}\text{Mn}^{4+}_{0.13}\text{O}_{2.65}$

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

Теплофизические свойства мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{FeO}_3$ ($x=0-0.20$)

**Каллаев С.Н.^{1,2}, Бакмаев А.Г.¹, Омаров З.М.¹, Митаров Р.Г.³,
Садыков С.А.², Хасбулатов С.В.⁴**

¹*Институт физики ДагНЦ РАН, Махачкала, Россия.*

²*Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия.*

³*Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Россия.*

⁴*Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета,
Ростов на Дону, Россия.*

(E-mail: kallaev-s@rambler.ru)

В данной работе представлены результаты исследований теплофизических (теплоемкости, термодиффузии и теплопроводности) свойств мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{FeO}_3$ в широкой области температур 130-1100К.

Результаты исследований теплоемкости мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{FeO}_3$ (где $x=0-0,2$) в области температур 130-800К показывают, что незначительные замещения висмута европием заметно смещают температуру антиферромагнитного фазового перехода и приводят к увеличению величины теплоемкости в широком интервале температур $T \geq 140\text{K}$. Причем с увеличением x ($0 < x \leq 0.10$) температура T_N смещается в область высоких температур, а для составов с $x \geq 0.15$ T_N смещается в область низких температур. На основании результатов исследования теплоемкости построена фазовая диаграмма T_N-x для системы $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{FeO}_3$. Показано, что дополнительный вклад в теплоемкость при легировании феррита висмута BiFeO_3 европием можно интерпретировать как аномалию Шоттки для трехуровневых состояний. Трехуровневая система при легировании редкоземельным элементом Eu может возникать вследствие искажения параметров решетки за счет полярных смещений ионов висмута и железа из исходных позиций и изменения угла связи между кислородными октаэдрами FeO_6 .

На температурных зависимостях теплоемкости для составов с $x=0.10$ и 0.15 наблюдается дополнительные аномалии, характерные для фазовых переходов, при температурах $T \approx 415\text{K}$ и $T \approx 690\text{K}$, соответственно. Обнаруженные аномалии для составов с $x=0,1$ и $0,15$ и их анализ совместно с данными структуры свидетельствуют о том, что они могут быть обусловлены появлением полярных областей с моноклинной структурой. Причем, для состава с $x=0,15$ наблюдается аномалия, характерная для размытого фазового перехода.

Проведены исследования термодиффузии и теплопроводности мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{FeO}_3$ в области высоких температур 300-1100К. Обнаружено, что легирование редкоземельным элементом европием приводит к существенному изменению температурных аномалий термодиффузии и теплопроводности области антиферромагнитного и сегнетоэлектрического фазового перехода. Установлены доминирующие механизмы теплопереноса фононов в области фазовых переходов. Определена зависимость средней длины свободного пробега фононов от температуры. Показано, что структурные искажения (т.е. центры рассеяния), ограничивающие длину свободного пробега фононов в мультиферроиках имеют величину порядка постоянной решетки. Отмечается, что уменьшение величины теплопроводности при $T \leq T_N$ связано с появлением дополнительных локальных искажений кристаллической решетки (т.е. центров рассеяния фононов) за счет замещения ионов висмута на ионы меньшего радиуса европия.

Магнитокалорический эффект в мультиферроиках BiFeO_3 замещенных Zn

Chaudhary Y.A.¹, Bendre S.T.¹, Макоед И.И.², Амиров А.А.³,
Юсупов Д.М.³, Родионова В.В.⁴, Чичай К.А.⁴

¹*Department of Physics, School of Physical Sciences, North Maharashtra University, Maharashtra, India*

²*Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина, Брест, 224016, Белоруссия*

³*Институт физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН, Махачкала, 367003, Россия (E-mail: amiroff_a@mail.ru)*

⁴*Научно-технологический парк "Фабрика", Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236016, Россия*

Как известно, к мультиферроикам относятся соединения, которые сочетают хотя бы два из трех известных ферроэлектрических упорядочений – магнитное, сегнетоэлектрическое и механическое. Следовательно, в мультиферроиках могут наблюдаться и все три вида калорических эффектов, характерных для материалов с вышеперечисленными видами упорядочений. Тем не менее, несмотря на то, что в последнее время мультиферроики исследуются достаточно активно, калорические эффекты в них все еще остаются малоизученными. Другой проблемой экспериментального исследования калорических эффектов в них является тот факт, что большинство изученных мультиферроиков имеет высокие температуры фазовых переходов, величины эффектов малы, а имеющиеся экспериментальные методики измерения калорических свойств в области высоких температур имеют высокую погрешность. С учетом этого в качестве объектов исследования нами были выбраны керамические образцы BiFeO_3 , в которых ион Fe замещен двухвалентным ионом Zn.

Керамические образцы $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ ($x = 0.1, 0.15$ и 0.2) были получены методом жидкофазной реакции из прекурсоров $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, которые были использованы в качестве окислителей, а $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})$ использовался как топливо для сжигания. Для образцов $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ ($x = 0.1, 0.15$ и 0.2) были выполнены измерения намагниченности в зависимости от температуры в магнитном поле 0,6 Тл. Для всех исследованных образцов в области 630 К наблюдается характерная для магнитных материалов аномалия, которая соответствует температуре антиферромагнитного перехода.

Используя экспериментальные данные по намагниченности были проведены численные расчеты магнитокалорических параметров на основе феноменологического модели предложенной в работе [1]. Результаты расчетов подтверждают наличие магнитокалорического эффекта в окрестности точки Нееля. Концентрационные зависимости максимальных величин магнитных вкладов в энтропии, относительных мощностей охлаждения и магнитных вкладов в теплоемкости образцов указывают на их зависимость от величины концентрации x добавки Zn в $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$. Полученные результаты могут быть использованы при изучении особенностей фазовых магнитных переходов и оценки магнитокалорического эффекта в высокотемпературных мультиферроиках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hamad, M.A., J. Adv. Ceram. 1(4), 290 (2012).

Формирование дендритных микро- и нано-доменных структур в одноосных сегнетоэлектриках

Шур В.Я., Ахматханов А.Р.

*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет
Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: vladimir.shur@urfu.ru)*

Исследовано формирование самоподобных дендритных доменов при переключении поляризации в одноосных сегнетоэлектриках с искусственным диэлектрическим поверхностным слоем, а также при импульсном нагреве/охлаждении. Для объяснения использована аналогия движения доменных стенок и перемещения фазовых границ.

Экспериментально исследовалось переключение поляризации в монокристаллах ниобата лития (LN) и танталата лития (LT) при повышенных температурах. Для *in situ* визуализации кинетики доменов использовалась оптическая микроскопия. Микроскопия пьезоэлектрического отклика и сканирующая электронная микроскопия позволяли визуализировать доменную структуру с разрешением до 2 нм, а конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния - доменные стенки в объеме [1,2]. Переключение производилось: (1) однородным полем в пластинах с диэлектрическими слоями на полярной грани, (2) пироэлектрическим полем после импульсного нагрева [3,4].

В LT обнаружено формирование ансамблей нанодоменных снежинок после нагрева выше температуры фазового перехода [5,6] за счет обратного переключения в поверхностном слое растущих доменов. Рост дендритов в стехиометрическом LN при повышенной температуре обусловлен дискретным переключением и ориентированным ростом нанодоменных цепей [7,8]. В конгруэнтном LN со слоем SiO₂ «снежинки» формировались за счет расщепления и ветвления доменных лучей [9].

Для объяснения использован кинетический подход с учетом образования остаточного деполяризующего поля за движущейся стенкой [9,10]. Для теоретического описания использовалась аналогия между движением доменных стенок и перемещением фазовых границ. Предложенный подход впервые использован для моделирования топологической неустойчивости плоской доменной стенки при сильнонеравновесных условиях переключения поляризации. Справедливость модели подтверждена совпадением результатов компьютерного моделирования и эксперимента. Полученные результаты могут быть использованы для создания нового класса фотонных устройств [11].

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-12-00826).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shur V.Ya., Zelenovskiy P.S., Nebogatikov M.S. et al., J. Appl. Phys. **110**, 052013 (2011).
2. Shur V.Ya. and Zelenovskiy P.S., J. Appl. Phys. **116**, 066802 (2014).
3. Shur V.Ya., Mingaliev E.A., Lebedev V.A. et al., J. Appl. Phys. **113**, 187211 (2013).
4. Shur V.Ya., Mingaliev E.A., Kuznetsov D.K. et al., Ferroelectrics **443**, 95 (2013).
5. Shur V.Ya., Kosobokov M.S., Mingaliev E.A. et al., AIP Advances **5**, 107110 (2015).
6. Shur V.Ya., Kosobokov M.S., Mingaliev E.A. et al., J. Appl. Phys. **119**, 144101 (2016).
7. Shur V.Ya., Chezganov D.S. et al., J. Appl. Phys. **112**, 104113 (2012).
8. Shur V.Ya., Akhmatkhanov A.R. et al., Appl. Phys. Lett. **103**, 242903 (2013).
9. Shur V.Ya., Akhmatkhanov A.R., Pelegova E.V., Ferroelectrics **500**, 76 (2016).
10. Shur V.Ya. J. Mat. Res. **41**, 199 (2006).
11. Shur V.Ya., Akhmatkhanov A.R., Baturin I.S. Appl. Phys. Rev. **2**, 604 (2015).

Исследование кинетики доменной структуры в монокристаллах титанил-фосфата калия для создания регулярных доменных структур

**Ахматханов А.Р.¹, Пелегова Е.В.¹, Васькина Е.М.¹,
Чувакова М.А.¹, Шур В.Я.¹, Иванов М.², Холкин А.Л.²**

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: andrey.akhmatkhanov@urfu.ru)*

²*Department of Physics and CICECO-Aveiro Institute of Materials, Aveiro, 3810-193, Португалия*

Проведено экспериментальное исследование формы доменов и кинетики доменной структуры в монокристаллах титанил-фосфата калия (KTiOPO_4 , КТР) с использованием взаимодополняющих методов.

Впервые оптическая микроскопия без селективного химического травления была использована для визуализации доменной структуры и ее эволюции. Данный эффект отнесен за счет электрооптического эффекта - изменения показателя преломления вблизи доменной стенки под действием остаточного деполяризующего поля. *In situ* визуализация эволюции доменной структуры в процессе переключения поляризации позволила выявить два типа формы изолированных доменов: прямоугольник и ромб, ориентированные вдоль Y кристаллографического направления. Выявлено два типа движущихся доменных стенок. (1) Стенки ромбических доменов, отклоненные от Y кристаллографического направления на угол менее 10 градусов (Y_+ стенки). (2) Стенки, отклоненные от X кристаллографического направления на угол около 30 градусов (X_{+30} стенки). Показано, что X_{+30} стенки двигаются существенно быстрее Y_+ стенок.

Обнаружено скачкообразное движение доменных стенок обоих типов, вызванное слиянием доменов. Исследован эффект стабильности формы домена, представляющий собой быстрое (по сравнению со временем переключения) восстановление ромбической формы домена после слияния небольших изолированных ромбических доменов. Для объяснения полученных эффектов предложена модель движения доменных стенок за счет генерации элементарных ступеней и движения кинков [1].

Обнаружен эффект обратного переключения поляризации, вызванный селективным химическим травлением. Данный эффект отнесен за счет действия остаточного деполяризующего поля, возникающего в результате частичного удаления экранирующего заряда при травлении.

Полученные результаты представляют значительный интерес для создания регулярных доменных структур в КТР для нелинейно-оптических устройств [2].

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ, при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Акт 211, Соглашение 02.А03.21.0006), РФФИ (Грант 16-02-00724-а) и гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых (договор №14.У30.17.2837-МК).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shur V.Ya., Vaskina E.M., Pelegova E.V., Chuvakova M.A., Akhmatkhanov A.R., et al, *Appl. Phys. Lett.* **109**, 132901 (2016).
2. Shur V.Ya., Pelegova E.V., Akhmatkhanov A.R., and Baturin I.S., *Ferroelectrics*, **496**, 49 (2016).

Доменная структура монокристаллов β -глицина

**Васильева Д.С.¹, Васильев С.Г.¹, Зеленовский П.С.¹, Шур В.Я.¹,
Холкин А.Л.^{1,2}**

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: semen.vasilev@urfu.ru)*

²*Department of Physics & CICECO – Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro,
Aveiro, 3810-193, Portugal*

Исследование сегнетоэлектрических свойств органических молекулярных кристаллов является одной из актуальных задач. Интерес к этому классу кристаллов связан с возможностью их применения в биосовместимых электрооптических и электро-механических устройствах, так как они многие из них обладают ярко выраженными пьезоэлектрическими и нелинейно-оптическими свойствами, практически не уступающими неорганическим кристаллам.

Недавние исследования монокристаллов простейшей аминокислоты глицина ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) показало, что среди трех полиморфных фаз α , β и γ , формирующихся при нормальных условиях, только β -фаза обладает пьезоэлектрическими и сегнетоэлектрическими свойствами [1]. Однако, чувствительность β -глицина к влажности, температуре и механическому воздействию является существенной проблемой, не позволяющей создавать крупные кристаллы для исследования и последующих применений [2,3].

Монокристаллы с лежащей в плоскости подложки полярной осью были выращены из капель водного раствора, помещенных на подложку Pt/SiO/Si и высушенных на воздухе с контролируемой влажностью. Было проведено детальное экспериментальное исследование нейтральных и заряженных стенок в микрокристаллах β -глицина с помощью атомной силовой микроскопии и силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика на микроскопах Ntegra Aura (NT-MDT, Russia) и Asylum MFP 3D SA (Asylum Research, USA).

Было показано, что исходная доменная структура состоит из вытянутых вдоль полярной оси доменов с нейтральными стенками и двумя типами заряженных стенок [4]. Было обнаружено, что заряженные доменные стенки «хвост-к-хвосту» и «голова-к-голове» имеют различную форму, что можно отнести за счет различия проводимости стенок. Было обнаружены ямки глубиной 0,2-1 нм и шириной около 150 нм, вытянутые вдоль заряженных стенок. Формирование этих особенностей в топографии было объяснено избирательным травлением поверхности кристаллов во влажном воздухе. Подобные ямки появлялись и вдоль нейтральных доменных стенок в результате деформации кристаллической решетки вблизи доменной стенки. Кроме того были проведены исследования локального переключения поляризации на неполярном срезе путем приложения напряжения к проводящему зонду.

Исследование выполнено с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (постановление 211, контракт 02.A03.21.0006).

ЛИТЕРАТУРА

1. Heredia A., Meunier V., et al., *Adv. Funct. Mater.*, **22**, 2996 (2012).
2. Isakov D., Petukhova D., et al., *Cryst. Growth Des.*, **14**, 4138 (2014).
3. Jiang Q., Shtukenberg A.G., et al., *Cryst. Growth Des.*, **15**, 2568 (2015).
4. V.S. Bystrov, E. Seyedhosseini, et al., *Ferroelectrics*, **496**, 28 (2016).

Кинетика доменной структуры кристалла ТГС вблизи температуры фазового перехода

Голицына О.М.¹, Дрождин С.Н.¹, Чулакова В.О.¹

¹Воронежский государственный университет Воронеж, 394006, Россия
(E-mail: golitsynaom@yandex.ru)

Методом атомной силовой микроскопии в контактном режиме пьезоэлектрического отклика исследована кинетика неравновесной полосчатой доменной структуры сегнетоэлектрического кристалла триглицинсульфат (ТГС) вблизи температуры фазового перехода ($0.1 \text{ K} \leq \Delta T_C \leq 1.0 \text{ K}$). Изучены закономерности временного поведения основных параметров такой доменной структуры.

Показано, что:

1) суммарные размеры доменов в кристаллографическом направлении [001] и перпендикулярном ему, а также полное число доменов экспоненциально уменьшаются со временем. Средние размеры доменов вдоль этих направлений со временем изменяются по степенному закону $\langle w \rangle \sim t^\varphi$. Значения показателя φ в зависимости от температуры варьируются от 0.45 до 0.93, указывая на неконсервативность макроскопического параметра порядка [1], характеризующего доменную структуру кристалла ТГС в исследованном интервале температур;

2) средние скорости $\langle v \rangle$ развития доменов вдоль кристаллографического направления [100] выше, чем вдоль [001], что связано с большей величиной эффективного электрического поля, действующего на участки доменных границ с меньшим радиусом кривизны;

3) отношение суммарного периметра доменных границ L к числу доменов N , т.е. значение среднего периметра $\langle l \rangle$ домена, со временем практически не изменяется и увеличивается при удалении от точки Кюри;

4) заметное изменение величины суммарного заряда на поверхности кристалла наблюдается только вблизи T_C и примерно в первые 30 минут после прохождения фазового перехода, что подтверждает неконсервативность параметра порядка в этих условиях. Далее с течением времени величина заряда не изменяется и близка к нулю, указывая на переход параметра порядка к консервативному состоянию;

5) суммарный периметр L доменных стенок растет при приближении к T_C , а его температурное поведение не подчиняется степенной зависимости $L \sim \{(T_C - T) / T_C\}^{-\eta}$ с показателем степени $\eta = 0.25$, предсказываемой термодинамической теорией сегнетоэлектричества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bray A.J. // *Advances in Physics*, 1994, vol. 43, p. 357-459.

Влияние внешних воздействий на доменную структуру кристаллов титаната бария

**Киселев Д.А.¹, Ильина Т.С.¹, Большакова Н.Н.², Семенова Е.М.²,
Кузнецова Ю.В.², Сергеева О.Н.², Малинкович М.Д.¹**

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, 119049, Россия (E-mail: dm.kiselev@gmail.com)

²Тверской государственный университет, Тверь, 170100, Россия

В настоящей работе представлены результаты исследования кинетики доменной структуры (ДС), сопровождающей процессы переполаризации кристаллов BaTiO₃, как во внешних электрических полях, так и при изменении температуры. Исследования выполнены независимо двумя неразрушающими методами: поляризационно-оптическим с помощью микроскопа Neophot-30 и силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика (СПМ) с использованием сканирующего зондового микроскопа MFP-3D™ Stand Alone Asylum Research и кантилеверов марки Asyelec01. Применение метода СПМ обусловлено тем, что разрешение определяется радиусом острия кантилевера (~15 нм), что позволяет

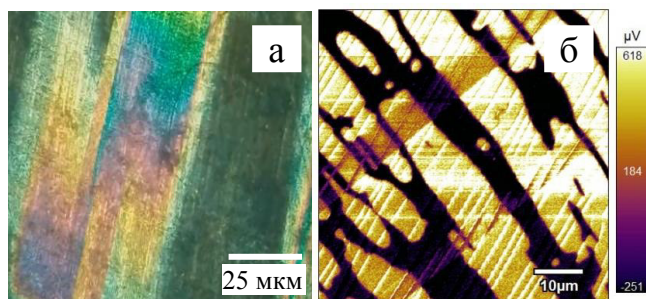


Рис.1. Изображения доменной структуры кристаллов BaTiO₃, полученные: а – поляризационно-оптическим методом в отраженном свете. б – СПМ

получить высокоточные результаты. На рис.1 представлены изображения доменной структуры кристалла BaTiO₃, полученные вышеописанными методами. Видно, что исходная ДС представлена *a*- и *c*-доменами, а СПМ-методом обнаружена субструктура *c*-доменной области, которая существенно реагирует на изменение величины и направления внешнего поля. По локальным петлям пьезоэлектрического гистерезиса определены значения коэрцитивного напряжения, которые составляют порядка ±10 В. На рис. 2 представлено полученное методом СПМ изображение доменной границы выделенного участка доменной структуры кристалла BaTiO₃ и профиль фазового сигнала, проходящий через междоменную границу. Видно, что сигнал фазы на границе раздела меняет свое значение на 180°, что свидетельствует об изменении направления вектора поляризации. Аппроксимация полученного профиля позволяет рассчитать ширину доменной стенки, которая, по нашим оценкам, составляет 25 нм.

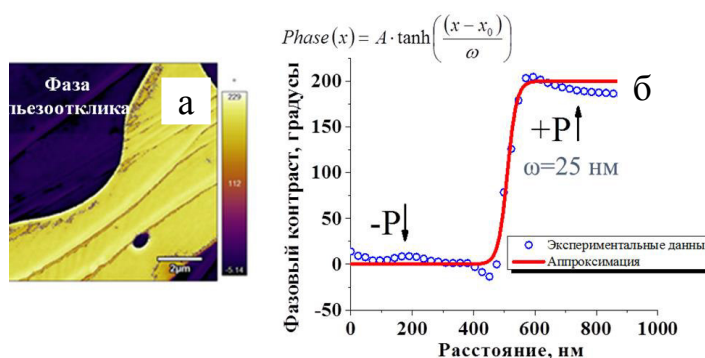


Рис.2. Изображение 180° доменной структуры титаната бария (а) и профиль фазового сигнала, проходящий через междоменную границу (б)

В работе также проведены циклы нагрева и охлаждения образцов кристалла BaTiO₃, включающие температуры фазовых переходов. Двумя независимыми методами показано, что при каждом последующем цикле формируется «новая» доменная структура, состоящая в основном из *a*-доменных областей.

Доменная инженерия в оптических волноводных структурах

Волк Т.Р.

¹*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, 119333, Россия (E-mail: volk-1234@yandex.ru)*

Микро- и нанодоменные структуры служат в качестве эффективной нелинейной среды для преобразования частоты оптического излучения на основе принципа фазового квазисинхронизма. В контексте интегральной оптики возникает проблема преобразования оптических частот этим способом в оптических волноводных структурах, созданных в сегнетоэлектриках, в частности, в волноводах на основе LiNbO₃, являющегося одним из базовых материалов интегральной оптики.

Представлены результаты записи устойчивых доменов и доменных структур с заданным дизайном с помощью поля зонда АСМ и электронного луча РЭМ в оптических волноводах нового поколения – сэндвич-структурах типа LNOI (Lithium-Niobate-On-Insulator) и волноводных слоях, полученных на LiNbO₃ имплантацией ионов He. В структурах LNOI показана возможность управления формой и размером записанных структур в широких пределах – от наноразмерных одиночных доменов до 2D структур размером до десятков мкм с произвольной конфигурацией.

Обсуждается специфика формирования доменов, факторы, определяющие характеристики записанных структур, возможности используемых микроскопических методов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 16-29-11777_офи-м и 16-02-00439а)

Литература

- R. V. Gainutdinov, T. R. Volk, H. Zhang, Appl. Phys. Lett. **107**, 162903 (2015).
T. R. Volk, L. S. Kokhanchik, R. V. Gainutdinov, e.a. IEEE J. Lightwave Tech **33**, 4762 (2015).
T. R. Volk, R. V. Gainutdinov, H. Zhang, Appl. Phys. Lett. **110**, 132905 (2017).

Особенности формирования доменов в кристаллах ниобата лития под действием электронного луча

Коханчик Л.С.¹, Волк Т.Р.²

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка, 142432, Россия (E-mail: mlk@iptm.ru)*

² *Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва, 119333, Россия*

Исследование процессов переполяризации является важной задачей физики сегнетоэлектриков. Переполяризация под действием поля зарядов, внедряемых сфокусированным электронным лучом в кристаллах ниобата лития (LN) относится к области, имеющей научное и прикладное значение благодаря потенциальным возможностям доменных структур с заданной конфигурацией для различных применений. Исследование формирования доменов на неполярных (Y,X) срезах LiNbO_3 при электронном облучении представляет интерес, поскольку возможность прямого наблюдения доменов, растущих в данном случае планарно (в приповерхностном слое неполярного среза) вдоль оси Z [1], облегчает изучение закономерностей нуклеации и движения доменных стенок.

Мы докладываем результаты исследований ([2,3] и ссылки) влияния различных факторов на закономерности формирования доменов на неполярных (Y -) срезах конгруэнтного ниобата лития (CLN) при облучении в растровом электронном микроскопе (РЭМ), выполненных в кристаллах LN. Изучалось влияние режимов облучения (ускоряющего напряжения, тока электронного луча, времени облучения t_{irr}) на характеристики созданных доменных структур, а также возможность изменения этих характеристик путем варьирования собственной дефектной структуры легированием примесью Zn (CLN-Zn) или восстановительным отжигом (RLN).

Во всех случаях глубина зарождения доменов T_d и скорость фронтального роста V_f вдоль оси Z подчиняются общим закономерностям: T_d определяется энергией U РЭМ, V_f линейно растет с t_{irr} , следуя закону вязкого трения. Пороговая доза зарождения доменов D_{thr} зависит от токов утечки из зоны облучения и увеличивается с ростом проводимости кристалла; как следствие, D_{thr} в восстановленных кристаллах RLN существенно превышает D_{thr} в CLN. Скорость фронтального роста V_f определяется характером и концентрацией собственных (структурных) дефектов, служащих в качестве центров пиннинга доменных стенок. В CLN-Zn наблюдается увеличение V_f по сравнению с CLN благодаря снижению концентрации центров пиннинга Nb-antisite (Nb_{Li}) [4]. В RLN имеет место резкое снижение V_f , вследствие фундаментального изменения типа собственных дефектов при восстановительном отжиге [4]. Комплекс полученных результатов позволяет осуществить выбор оптимальных условий записи доменов в РЭМ в зависимости от свойств материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kokhanchik L.S., Punegov D.V., Proc. SPIE. **7025**, 70250J (2008).
2. Kokhanchik L.S., Volk T.R., Appl. Phys. B. **110**, 367 (2013).
3. Kokhanchik L. S., Gainutdinov R. V., Lavrov S. D., Volk T. R., J. Appl. Phys. **118**, 072001 (2015).
4. Volk T., Woehlecke M., *Lithium niobate: defects, photorefraction and ferroelectric switching*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2008).

Работа поддержана РФФИ (проекты 16-29-11777-офи-м, 16-02-00439-а)

Исследование процессов доменообразования в тонких монокристаллических пленках LiNbO_3 в поле зонда атомно-силового микроскопа

Гайнутдинов Р.В.¹, Волк Т.Р.¹, Лавров С.Д.², Zhang Н.Н.³

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, 119333, Россия (E-mail: radmir@crys.ras.ru)

²МИРЭА, Москва, 119454, Россия

³Jinan Jingzheng Electronics Co. Ltd., Jinan, People's Republic of China

В последнее время возрастающий интерес привлекают волноводы нового поколения сэндвичивого типа «пленка LiNbO_3 на изоляторе» (LNOI). Интерес к таким структурам связан с созданием различных оптических устройств в интегральном (волноводном) исполнении. В частности использование устройств на основе таких волноводов для преобразования частоты лазерного излучения в режиме фазового квази-синхронизма (QPM) на сегнето-электрической доменной структуре. Тем самым возникает задача формирования доменных структур с заданным дизайном микро- и суб-микромасштаба в устройствах LNOI, что требует изучения механизмов процесса доменообразования в таких структурах.

В данной работе представлены результаты исследований доменообразования в тонких монокристаллических пленках LiNbO_3 в поле зонда атомно-силового микроскопа. Изображения доменов получали методом силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМП). Впервые в LiNbO_3 получены локальные петли пьезоэлектрического гистерезиса при подаче цуга импульсов с заданной скважностью. Анализ петель гистерезиса позволил выявить низкочастотную дисперсию коэрцитивного поля E_c и поля смещения E_b , а также отсутствие обратного переключения вплоть до длительности импульса 1 мс. Наблюдаемая динамика доменов обнаруживает несомненное влияние пиннинга доменов на интерфейсе. Изучены временные и полевые кинетики переключения в поле зонда АСМ (зависимости диаметра домена от величины приложенного напряжения U и длительности импульса t_p). Впервые в пленках записаны одномерные и двухмерные регулярные доменные структуры (рис. 1). Обнаружен эффект коалесценции доменов по мере их сближения, связанный, как предполагается, с отсутствием электростатического отталкивания между доменами благодаря "повышенной проводимости доменных стенок". Методом атомно-силовой микроскопии проводимости изучена статическая проводимость на границах доменов.

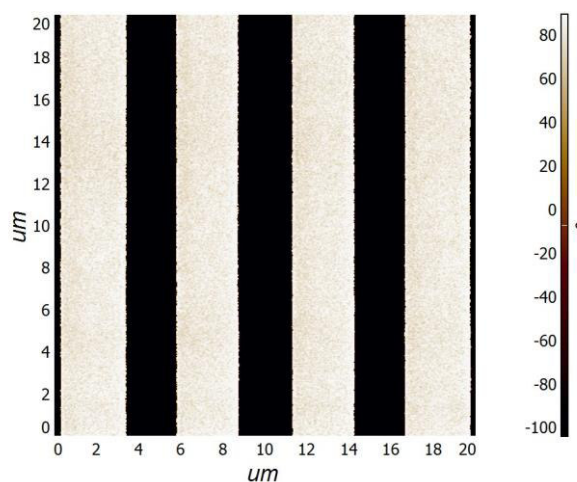


Рис. 1. СМП-изображение доменной структуры, записанной в LNOI.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Poberaj, H. Hu, W. Sohler and P. Guenter, Laser & Photonics Rev., 6, 488, (2012).

Эффекты обратного переключения в релаксорном сегнетоэлектрике SBN, исследованные методом PFM спектроскопии

Симагина Л.В.¹, Боднарчук Я.В.¹, Гайнутдинов Р.В.¹, Волк Т.Р.¹, Ивлева Л.И.²

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, 119333, Россия (E-mail: deuten@mail.ru)

²Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991, Москва, Россия

Твердые растворы $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN) являются удобным объектом для изучения возможностей АСМ для доменной инженерии и исследования сегнетоэлектрического переключения в релаксорных сегнетоэлектриках. В докладе представлены результаты исследования быстрой (в диапазоне ms) компоненты релаксации поляризации в кристаллах SBN-х, интерпретированной как обратное переключение. Исследования проведены методом PFM спектроскопии, т.е. измерения локальных петель пьезоэлектрического гистерезиса H_ω - U_{DC} под действием П- импульсов длительностью t_p с интервалом между импульсами Δt (1 – 1000 ms).

При $t_p < 1000$ ms характеристики петли обнаруживают сильную зависимость от t_p и Δt (Рис. 1); высота H петли, характеризующая остаточную поляризацию P_r , увеличивается с ростом t_p и уменьшается с ростом Δt (Рис. 1). На рис. 2 показана зависимость относительного уменьшения $\Delta H/H_{max}$ от скважности импульсов $t_p/\Delta t$.

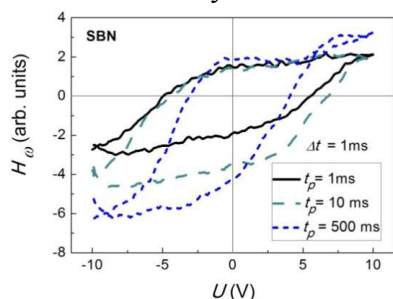


Рис. 1 H_ω - U_{DC} петли пьезоэлектрического гистерезиса, полученные при $\Delta t = 1$ ms и $t_p = 1, 10$ и 500 ms.

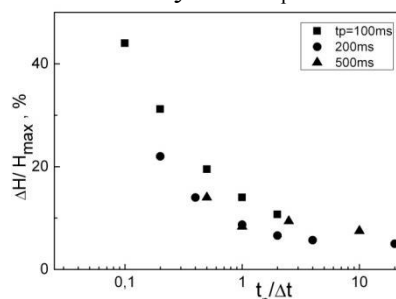


Рис. 2 Зависимость относительного уменьшения $\Delta H/H_{max}$ от скважности импульсов $t_p/\Delta t$.

Эффект обратного переключения проявляется в значительном уменьшении H при $t_p/\Delta t > 1$. Особенностью обратного переключения в SBN являются большие времена (≈ 1000 ms), необходимые для установления стабильного состояния P_r , что на порядки выше тех же характеристик в модельных сегнетоэлектриках. В этом же частотном интервале впервые наблюдалась зависимость коэрцитивного поля от интервала между полевыми импульсами. Эти особенности обратного переключения связаны с выраженными эффектами пиннинга доменных стенок, характерными для релаксорных сегнетоэлектриков.

Работа выполнена в рамках программы ОФН РАН «Новые кристаллические и наноструктурированные материалы для энергоэффективных технологий», Я.В.Б. и Л.В.С. выражают благодарность за поддержку РФФИ №16-32-00319 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

L.Simagina, T.Volk, Ya.Bodnarchuk, R.Gainutdinov, and L.Ivleva, *Ferroelectrics Letters*, 2017, в печати

Процессы усталости в триглицинсульфате и влияние на них магнитного поля

Иванова Е.С., Петржик Е.А., Гайнутдинов Р.В., Лашкова А.К., Волк Т.Р.

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия (E-mail: ivanova.el.ser@gmail.com)

Методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) совместно с измерениями диэлектрических свойств сопоставлена дефектная структура кристаллов триглицинсульфата (TGS) as-grown и после длительной обработки переменным электрическим полем. Получены первые результаты по влиянию магнитного поля на диэлектрические свойства кристаллов, в которых наблюдались процессы усталости [1].

Образцы подвергались длительному (более 100 часов) воздействию переменного электрического поля $f = 50$ Hz, $E = 1$ kV/cm, что соответствует $\sim 10^7$ циклам переполяризации. Концентрация и распределение дефектов в исходном и «уставшем» образцах исследовались методом СЗМ в прерывисто-контактном режиме. Критерием дефектного состояния TGS служила структура нанорельефа на полярном сколе (010) (округлые выступы и ямки субмикронных латеральных размеров с высотой и глубиной $\frac{1}{2} b = 0.63$ nm, где b – постоянная решетки) [2].

Длительное воздействие переменного электрического поля приводило к резкому уменьшению диэлектрической проницаемости в области фазового перехода и деградации петель P - E гистерезиса (уменьшению P_s , увеличению E_c и E_b). Изменения диэлектрических свойств сопровождались возрастанием плотности дефектных нанокластеров и расширением спектра их распределения по размерам (Рис.1). Таким образом, впервые обнаружена прямая качественная корреляция процессов усталости, проявляющихся в изменении диэлектрических свойств, с изменением дефектной структуры.

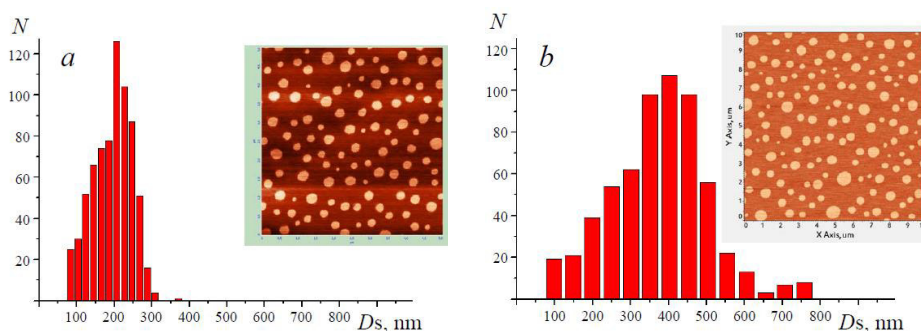


Рис. 1. Гистограммы распределения по диаметрам D_s выступов на поверхности скола (010) и АСМ изображение этих поверхностей для исходного (а) и «уставшего» (b) TGS

Последующая выдержка «уставших» кристаллов в постоянном магнитном поле приводила к симметризации петли гистерезиса и перестройке структуры нанокластеров.

Работа частично поддержана Президиумом РАН (Программа № I.1П.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Е.С., Петржик Е.А., Гайнутдинов Р.В., Лашкова А.К., Волк Т.Р. ФТТ **59**, вып. 3 (2017), в печати
2. Н. В. Белугина, Р. В. Гайнутдинов, А. Л. Толстихина, В. В. Долбинина, Н. И. Сорокина, О. А. Алексеева. Кристаллография **56**, 1139 (2011).

Влияние деполяризующих полей на фазовые переходы в сегнетоэлектрических композитах

Даринский Б.М., Сидоркин А.С., Золотухина М.А., Нгуен Х.Т.

*Воронежский государственный университет Воронеж, 394018
(sidorkin@phys.vsu.ru)*

В настоящее время все большее внимание уделяется искусственным материалам с регулируемыми свойствами, получение которых основано на использовании наноразмерных эффектов. Среди указанных материалов одно из ведущих мест занимают сегнетоэлектрические нанокompозиты, свойства которых чрезвычайно чувствительны к размерным эффектам, что обусловлено повышенной ролью поверхностных или граничных эффектов в таких объектах. Одним из таких граничных эффектов является заметное изменение температуры перехода в полярное состояние. Практически во всех изученных нанокompозитах зарегистрировано смещение температуры Кюри по сравнению с соответствующими объемными материалами как в сторону высоких, так и в сторону низких температур. Фактором, повышающим T_c считается действие так называемого внутреннего поля, а факторами, понижающими T_c , – корреляционные эффекты за счет контакта сегнетоэлектрического включения с парафазой, а также деполяризующие поля, возникающие вблизи поверхности сегнетоэлектрических включений. Настоящая работа посвящена расчету деполяризующих полей, возникающих вблизи границ сферического сегнетоэлектрического включения, окруженного изотропным диэлектриком, и оценке влияния указанных полей на положение точки Кюри в рассматриваемых композитах. Определена температура указанного перехода как в отсутствие эффектов экранирования деполяризующего поля, так и при наличии эффектов экранирования. Показано, что в первом случае смещение точки Кюри определяется отношением константы Кюри к диэлектрической проницаемости матрицы. При наличии эффектов экранирования деполяризующего поля смещение температуры перехода уменьшается за счет умножения указанной величины на понижающий коэффициент, равный отношению длины экранирования к радиусу сегнетоэлектрического включения. Приводится пример материала, для которого опрокидывающее воздействие деполяризующего поля на точку Кюри оказывается особенно значительным [1]. Таким примером, на наш взгляд, является композит нанокристаллическая целлюлоза + нитрит натрия, у которого точка Кюри в сравнении с другими композитами смещена не вверх, а наоборот вниз по шкале температур примерно на 40 градусов по сравнению с объемным нитритом натрия. Такое поведение данного композита обусловлено тем, что в нем, в противоположность композиту нанокристаллическая целлюлоза + триглицинсульфат, где температура фазового перехода как обычно выше, чем в чистом ТГС, реально ослаблено или полностью отсутствует взаимодействие матрицы с окружением из-за того, что в нитрите натрия, в отличие от ТГС, нет водородных связей, которые обеспечивают сильное взаимодействие матрицы с внедряемым материалом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нгуен Х.Т. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Воронеж, ВГУ, 2016.

Диэлектрическая релаксация в сегнетоэлектриках с заряженными доменными стенками

**Есин А.А.¹, Аликин Д.О.¹, Турыгин А.П.¹,
Абрамов А.С.¹, Ахматханов А.Р.¹, Шур В.Я.¹**

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: alexander.esin@urfu.ru)*

Влияние доменных стенок на диэлектрические свойства сегнетоэлектрических материалов является предметом исследования уже более 30 лет. Главным образом, такой “внешний” вклад в диэлектрическую проницаемость объясняется перемещением доменных стенок во внешнем электрическом поле [1].

В данной работе исследовалась диэлектрическая релаксация в керамике ниобата калия натрия (KNN) с различной степенью легирования Sr^{2+} . В диапазоне частот от 10 Гц до 1 МГц обнаружен рост действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') части диэлектрической проницаемости с уменьшением частоты. При этом, увеличение концентрации Sr от 0 до 2% приводит к росту диэлектрической проницаемости, в то время как легирование с концентрацией более 2% приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости. Было установлено, что легирование приводит к уменьшению среднего размера зёрен и увеличению концентрации доменных стенок. Следует отметить, что в диапазоне легирования от 0 до 2% размер зёрен меняется незначительно, в то время как плотность доменных стенок резко возрастает. При дальнейшем увеличении степени легирования зерна уменьшаются и становятся монодоменными.

Обнаруженная зависимость диэлектрической проницаемости от концентрации доменных стенок была объяснена влиянием проводящих заряженных доменных стенок [2], которые были нами экспериментально обнаружены в керамике методом силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика.

Для подтверждения влияния заряженных доменных стенок на диэлектрическую проницаемость были проведены эксперименты в монокристаллических пластинах модельного одноосного сегнетоэлектрика ниобата лития. Установлено, что в монодоменных образцах диэлектрическая проницаемость в измеренном частотном диапазоне не зависит от частоты. Вместе с тем, создание в объеме образца доменов с заряженными стенками приводит к сильной частотной зависимости и росту ϵ' и ϵ'' на низких частотах более чем на порядок [3].

Заряженные доменные стенки были рассмотрены как проводящие включения, вызывающие диэлектрическую релаксацию по механизму Максвелла – Вагнера для сред с неоднородной электрической проводимостью. Частотные зависимости ϵ' и ϵ'' были аппроксимированы уравнением Коул-Коула. Проведенные расчеты показали, что наличие достаточно высокой концентрации проводящих доменных стенок может приводить к наблюдавшейся частотной зависимости диэлектрической проницаемости.

Исследование выполнено с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при поддержке Российского Научного Фонда (грант 14-12-00826).

ЛИТЕРАТУРА

1. Taylor, D Damjanovic, J. Appl. Phys. **82** 1973 (1997).
2. Esin A., Alikin D., Turygin A. et. al. , J. Appl. Phys. **121** 074101 (2017).
3. Esin A., Akhmatkhanov A., Shur V. KnE Materials Science **1**, 57 (2016).

Переключение переполаризации в заряженной доменной границе в тонкой сегнетоэлектрической пленке

Лазарев А.П.¹, Сигов А.С.², Даринский Б.М.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» Воронеж, 394000, Россия
(E-mail: lazarevap50@mail.ru)

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский технологический университет", Москва, 119454, Россия

Рассматривается тонкая сегнетоэлектрическая пленка нанометровой толщины, в которой возможные направления вектора спонтанной поляризации лежат в плоскости и перпендикулярно ориентации пленки.

В пленке создана заряженная доменная граница между контактирующими доменами с параллельными, но противоположно направленными векторами спонтанной поляризации. Определены условия, при которых в переходном слое заряженной доменной границы возникает компонента спонтанной поляризации, перпендикулярная плоскости пленки. Переходный слой при этом рассматривается как сегнетоэлектрический домен со спонтанной поляризацией, перпендикулярной плоскости пленки. Получены аналитические выражения для эффективного дипольного момента границы и для поля переполаризации. Предлагается система электродов вдоль поверхности сегнетоэлектрической пленки с многопроводной системой электрических проводов для покрытой диэлектриком сегнетоэлектрической тонкой пленки на металлической подложке.

Рассмотренная система обеспечивает переключение сегнетоэлектрических доменов, что позволяет использовать ее в качестве ячейки памяти в компьютерных устройствах, аналогичных БИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даринский Б.М., А.П. Лазарев, Сигов А.С. Переключение доменов в доменных границах // Конденсированные среды и межфазные границы. — Воронеж, 2013. — Т. 15, № 3, С.288-291.

Сегнетоэлектрические свойства керамик на основе титаната натрия-висмута

**Политова Е.Д.¹, Голубко Н.В.¹, Калева Г.М.¹, Мосунов А.В.¹,
Садовская Н.В.¹, Стефанович С.Ю.²**

¹Москва, Россия, Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова (E-mail: politova@cc.nifhi.ac.ru)

²Москва, Россия, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

Оксиды со структурой перовскита на основе титаната натрия-висмута ($\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ (NBT)) относятся к наиболее интенсивно исследуемым объектам, свойства которых можно изменять от диэлектрических, сегнето- и пьезоэлектрических до ионопроводящих введением различных добавок и регулированием стехиометрии [1, 2]. Актуальность исследований этих объектов определяется также необходимостью разработки материалов, не содержащих свинец.

В данной работе изучены особенности фазообразования, параметры структуры, диэлектрические и сегнетоэлектрические свойства керамик составов из области морфотропной фазовой границы в системе $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3 - \text{BaTiO}_3 - \text{Bi}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ (NBT-VT-BMT). Изучены также составы NBT-VT-BMT, модифицированные легкоплавкими добавками KCl, LiF, Bi_2O_3 и V_2O_5 , способствующими понижению температуры спекания керамик и регулированию стехиометрии оксидов. Керамические образцы получали методом твердофазного синтеза из оксидов и карбонатов двукратным обжигом при температурах $T_1=700 - 900^\circ\text{C}$ К (6 ч), $T_2=1100 - 1200^\circ\text{C}$ К (1 - 2 ч). Фазовый состав, параметры структуры и свойства керамик изучали с использованием комплекса современных физико-химических методов - РФА, ДТА, СЭМ, ГВГ и метода диэлектрической спектроскопии.

Установлено влияние состава на параметры структуры и микроструктуры твердых растворов, выявлены фазовые переходы вблизи 120 - 150 и 420 - 430°C. Фазовые переходы при 390 - 420 К демонстрируют выраженное релаксорное поведение, указывающее на присутствие полярных областей в неполярной матрице. Это подтверждается данными ГВГ и согласуется с рассмотрением изученных составов NBT-VT-BMT как состоящих из сегнетоэлектрических кластеров, внедренных в неполярную матрицу. Зарядовый беспорядок в А-позициях, занимаемых случайным образом размещенными катионами Bi^{3+} , Na^+ , Ba^{2+} , K^{1+} и Li^{1+} , определяет формирование случайных электрических полей, влияющих на локальный баланс между смещениями катионов в позициях А и катионов Ti^{4+} в противоположных направлениях и способствующих формированию релаксорных свойств керамик. При высоких температурах выявлены также эффекты диэлектрической релаксации, связанные с присутствием вакансий в подрешетке кислорода. Получено подтверждение улучшения сегнето- и пьезоэлектрических свойств керамик в системах, модифицированных легкоплавкими добавками, что свидетельствует об эффективности модифицирования свойств керамик на основе NBT-VT-BMT введением гетеровалентных добавок.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 15-03-03269).

ЛИТЕРАТУРА

1. Vakhrushev S.B., Isupov V.A., Kvyatkovsky B.E. et al, *Ferroelectrics*, **63**, 153 (1985).
2. Rodel J., Webber K.G., Dittmer R. et al, *J. Euro. Ceram. Soc.* **35**, 1659 (2015).

Обратный флексоэлектрический эффект в монокристаллах SrTiO_3 и KTaO_3

Залесский В.Г., Обозова Е.Д.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН Санкт-Петербург, 194021, Россия
(E-mail: nsh@mail.ioffe.ru)

Взаимосвязь градиента деформации и поляризации диэлектрического кристалла носит название флексоэлектрического эффекта (ФЭ) [1]. По аналогии с обратным пьезоэффектом, механический отклик в виде неоднородной деформации на внешнее электрическое поле определяет обратный флексоэлектрический эффект (ОФЭ). Роль этого электромеханического эффекта значительно возрастает в кристаллах и пленках субмикронного и наноскопического размера, что является актуальным для интегральной электроники и разработки микроэлектромеханических систем [1]. Одной из главных задач исследований является установление вида индуцированной неоднородной деформации (деформация кручения, цилиндрический и сферический изгиб) в кристаллах с различной симметрией.

Работа посвящена исследованию неоднородной деформации, индуцированной внешним полем в модельных кристаллах KTaO_3 (КТ) и SrTiO_3 (СТ). Выбор объектов исследования обусловлен тем, что КТ и СТ принадлежат семейству сегнетоэлектриков-перовскитов, в которых ФЭ достигает наибольших величин [1,2] и, в то же время, кристаллы являются кубическими параэлектриками, что сводит к минимуму влияние пьезоэффекта.

Градиенты индуцированной деформации тонких ($140 \mu\text{m}$) монокристаллических пластин КТ и СТ измерялись с помощью метода оптической интерферометрии [3]. При этом были получены следующие результаты:

Установлен тип индуцированной неоднородной деформации – сферический изгиб (Spherical Bending). Показано, что такого рода деформация в КТ и СТ сопровождается искажением элементарной ячейки из кубической симметрии $m\bar{3}m$ в ячейку с симметрией $4mm$.

Представлены зависимости величины неоднородной деформации от внешнего поля (рис.1.). В случае СТ наблюдается гистерезис, связанный с релаксацией деформации. Показано, что эта релаксация обусловлена влиянием объемного заряда.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 14-12-00257.

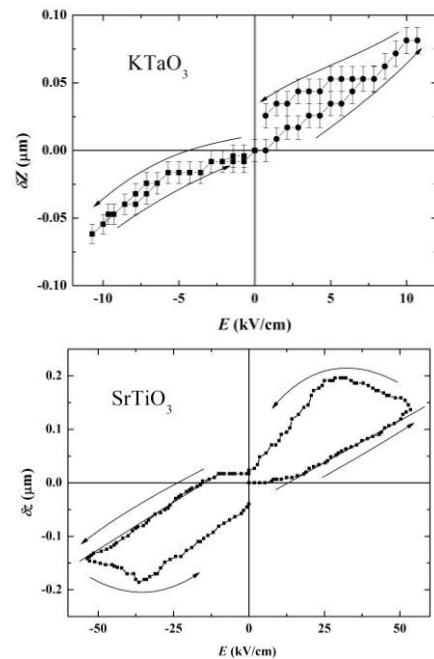


Рис. 1. Зависимость величины деформации изгиба от внешнего поля в KTaO_3 и SrTiO_3 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Zubko P., Catalan G. and Tagantsev A. Annu. Rev. Mater. Res. **43**, 387 (2013)
2. Залесский В. Г., Румянцева Е. Д. ФТТ **56**, 1301 (2014)
3. Обозова Е. Д., Залесский В. Г. Письма в ЖЭТФ, **103**, 792 (2016)

Термооптические исследования явлений ближнего полярного порядка в сегнетоэлектрической фазе. Индуцированная примесью Ca^{2+} сегнетофаза в SrTiO_3

Марковин П.А.¹, Трепаков В.А.¹, Гужва М.Е.^{1,2}, Квятковский О.Е.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Россия
(E-mail: P.Markovin@mail.ioffe.ru)

²Горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

В рамках фенологического подхода рассмотрены с учетом флуктуаций поляризации P выражения для спонтанного полярного вклада δn_i^S в главные значения показателя преломления, возникающего за счет спонтанного квадратичного электрооптического эффекта в сегнетоэлектриках. Предложен метод вычисления из температурных изменений спонтанного полярного вклада $\delta n_i^S(T)$ величины и температурной зависимости среднеквадратичных флуктуаций поляризации, характеризующих ближний, локальный полярный порядок $P_{sh} = \langle P_{fl}^2 \rangle^{1/2}$, ниже температуры сегнетоэлектрического перехода T_C , если независимыми измерениями определено среднее значение спонтанной поляризации $P_s = \langle P \rangle$, характеризующей дальний порядок. Метод адаптирован для нахождения P_s и P_{sh} из интерферометрических измерений - непосредственно из измеряемых температурных и электрополевых изменений относительного оптического пути света в кристалле. Вычисление P_{sh} ниже T_C особенно актуально для исследования систем с сосуществованием дальнего и ближнего порядка ниже T_C , когда вклады ближнего и дальнего порядка сравнимы по величине. К таким объектам, в частности, относятся квантовые параэлектрики SrTiO_3 и KTaO_3 с примесями. В них выше некоторой критической концентрации примеси индуцируется сегнетофаза. Величина $\langle P^2 \rangle^{1/2}$, включающая и дальний и ближний порядок оказывается значительно больше $P_s = \langle P \rangle$, что указывает на развитые пространственные флуктуации параметра порядка, характер которых качественно отличается от поведения классических термодинамических флуктуаций вблизи T_C .

Для апробации метода выполнены экспериментальные исследования интерферометрическим методом температурных и электрополевых изменений рефракции света, двупреломления, диэлектрической проницаемости и петель диэлектрического гистерезиса в монокристаллах $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{TiO}_3$. В $\text{Sr}_{0.986}\text{Ca}_{0.014}\text{TiO}_3$ выделен спонтанный вклад в рефракцию света. Из спонтанного вклада в рефракцию света на основе развитого нами метода впервые количественно определены величина и температурная зависимость среднеквадратичных флуктуаций параметра (поляризации) $P_{sh} = \langle P_{fl}^2 \rangle^{1/2}$, характеризующих ближний, локальный полярный порядок в сегнетофазе ниже температуры сегнетоэлектрического перехода T_C . Из оптических и диэлектрических измерений определено среднее значение спонтанной поляризации P_s , характеризующей дальний порядок. В $\text{Sr}_{0.986}\text{Ca}_{0.014}\text{TiO}_3$ при низких температурах величина P_{sh} оказалась в полтора раза больше чем P_s . Обсуждается механизм образования индуцированной сегнетофазы с развитыми пространственными флуктуациями в системе $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{TiO}_3$, приводящий к сосуществованию ближнего и дальнего полярного порядка.

Следует отметить, что предложенный метод исследования ближнего порядка при наличии дальнего ниже T_C основан на феноменологическом подходе, и может быть использован для других типов систем с сосуществованием ближнего и дальнего порядка. На настоящее время нам известны работы только по нахождению $P_{sh} = \langle P_{fl}^2 \rangle^{1/2}$ для простых частных случаев, когда спонтанная поляризация $P_s = \langle P \rangle = 0$.

Внутреннее поле и «мертвый слой» в тонких пленках ЦТС

**Пронин И.П.¹, Осипов В.В.¹, Каптелов Е.Ю.¹, Сергеева О.Н.²,
Богомолов А.А.²**

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Санкт-Петербург, 194026, Россия
(E-mail: Petrovich@mail.ioffe.ru)*

²*Тверской государственный университет, Тверь, 170100, Россия*

В тонких сегнетоэлектрических пленках под «мертвым» или пассивным слоем подразумевают неперекрывающиеся электрическим полем области, которые, как правило, находятся вблизи интерфейсов и характеризуются низкой диэлектрической проницаемостью. Наличие такого слоя приводит к импринту и серьезно затрудняет использование тонких пленок в элементах неразрушаемой памяти (FRAM). В литературе рассматривается несколько версий образования «мертвого слоя», среди которых наиболее популярными являются: а) включение инородных фаз или химическое взаимодействие материала пленки и электрода, б) механические напряжения, возникающие из-за рассогласования параметров решеток пленки и подложки или температурных коэффициентов линейного расширения, приводящих к структурным дефектам в) явление импринта, г) объемные заряды, сформированные захватом подвижных зарядов вблизи интерфейсов пленки [1-5].

В работе ex-situ методом ВЧ магнетронного распыления керамической мишени на подложках кремния и ситалла были сформированы тонкие слои цирконата-титаната свинца (ЦТС) различной толщины (200-1000 нм), кристаллизация фазы перовскита в которых проводилась при температурах 550-650°C. Структурные исследования показали, что сформированные слои характеризовались однофазностью (перовскитовой фазой), поликристалличностью и отсутствием какой-либо выраженной ростовой текстуры.

Согласно диэлектрическим исследованиям (P-V и C-V характеристики) тонкие слои ЦТС, в зависимости от толщины слоев и технологических условий их формирования, обладали различной величиной внутреннего поля. Построенные зависимости обратной диэлектрической проницаемости от толщины, как правило, имели линейный вид и позволяли определить толщину «пассивного» слоя. Показано, что величина пассивного слоя зависела от температуры кристаллизации и, как следствие, от избыточного содержания свинца.

Полученные результаты свидетельствуют в пользу модели формирования «мертвого» (или «пассивного») слоя в тонких слоях ЦТС, основанную на предположении об образовании вблизи интерфейсов сегнетоэлектрического слоя объемных зарядов (и соответствующих им внутренних электрических полей), вызванных захватом подвижных носителей заряда на глубокие ловушечные состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Etzold K.F., Roy R.A., Saenger K.L., et al., Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **200**, 297 (1990).
2. Lee J., Ramesh R., Keramidas V.G., Appl. Phys. Lett., **66**, 1337 (1995).
3. Abe K., Yanase N., Kavakubo T., Jpn. J. Appl. Phys., **39**, 4059 (2000).
4. Афанасьев В.П., Пронин И.П., Холкин А.Л., ФТТ, **48**, 1143 (2006)
5. Tagantsev A.K. and Gerra G. J. Appl. Phys., **100**, 051607 (2006).

Флексоэлектрическая поляризация, вызванная неоднородным нагревом пластинки

Юрков А.С., Хребтов М.Ю., Бобров М.С., Козюлин Н.Н., Юдин П.В.

*ИТ СО РАН Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д.1.
(E-mail: fitec@mail.ru)*

В последние годы в литературе активно обсуждаются различные аспекты, связанные с флексоэлектричеством. В частности, обсуждается возможность использования флексоэлектрического эффекта для создания преобразователей теплового возмущения в электрический сигнал [1]. В общих чертах такие преобразователи работают следующим образом. Неоднородный нагрев приводит к неоднородной термоупругой деформации кристалла (обычно сегнетоэлектрического), что, за счет флексоэлектрического эффекта, вызывает поляризацию кристалла и, как следствие, ток во внешней цепи. Поскольку флексоэлектрический эффект существенен в основном в наномасштабе, то кристаллы должны быть соответствующего размера по крайней мере в одном направлении. Удобнее всего использовать тонкие пластинки.

Таким образом, теоретическое рассмотрение флексоэлектрической поляризации пластинки, вызванной неоднородным нагревом, представляет несомненный интерес. В данной работе эта задача решается в простейшем приближении. Приближение заключается в том, что нагрев считается однородным вдоль пластинки, что позволяет обойтись несколько модифицированной теорией тонких пластинок, хорошо известной из литературы [2]. При этом также используется тот факт, что малость флексоэлектрических модулей позволяет пренебречь обратным влиянием электрической поляризации на вызвавшую ее неоднородную деформацию.

В работе показано, что неоднородный по толщине нагрев пластинки вызывает ее деформацию в виде трех слагаемых: изгиба, неоднородного растяжения по толщине, растяжения вдоль плоскости пластинки. Последнее слагаемое при нагреве, однородном по плоскости пластинки, не существенно, так как оно не порождает градиентов деформации. Для первых двух слагаемых получены явные формулы.

Получающаяся в результате электрическая поляризация также состоит из двух слагаемых: первое слагаемое связано с изгибом пластинки, второе – с неоднородным растяжением по толщине. Для нахождения первого слагаемого можно применить формулы из работы [3]. Для второго слагаемого выведена простая алгебраическая формула.

Также обсуждается вклад термополяризационного эффекта. Этот вклад сводится к перенормировке коэффициента в формуле для второго флексоэлектрического вклада.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ № 16-19-00119.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Bai, Z. Liu, Q. Xie, Y. Guo, W. Li, and X. Yan. *AIP Advances* **5**, 097117 (2015).
2. Л.Л. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теоретическая физика: т. 7. Теория упругости*. М.: 2001.
3. A.S. Yurkov, A.K. Tagantsev, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 022904 (2016).

Семейство сегнетоэлектриков-витлокитов

Стефанович С.Ю., Лазорьяк Б.И.

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва 119991,
Россия (E-mail: stefan@tech.chem.msu.ru)*

Семейство минерала витлокита относится к числу наиболее многочисленных. Первые свидетельства сегнетоэлектричества в виде острого максимума диэлектрической проницаемости при 1110 °С получены на монокристалле $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ в 1977 г. [1], однако систематические исследования семейства начались только 20 лет спустя. Для $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ (пр.гр. $R\bar{3}c$, $Z=21$) и изоструктурных ему ванадатов и фосфатов выявлены сегнетоэлектрические переходы I рода. Для входящих в семейство витлокита соединений $\text{Ca}_9\text{R}(\text{XO}_4)_7$ ($\text{R}=\text{P}\bar{3}\bar{2}$, $\text{X}=\text{P}, \text{V}$) переходы ближе к фазовым превращениям II рода [2]. Некоторые фосфаты являются антисегнетоэлектриками [3].

Шесть неэквивалентных позиций для крупных катионов определяют общую кристаллохимическую формулу витлокита $\text{M}_{10.5\pm x}(\text{XO}_4)_7$ ($Z=6$). Семейство формируется в результате размещения в позициях M различных катионов в 1, 2 и 3-валентном состоянии. Гомо- и гетеровалентные замещения в анионной части образуют ряды твердых растворов. Фосфатные представители имеют пониженные T_c , но всегда выше 450-500 °С. Поскольку механизм фазового перехода полярная-центросимметричная фаза включает разворот одного из семи входящих в формулу тетраэдров XO_4 ($\text{X}=\text{V}, \text{P}$), то переход невозможен при более низкой температуре. Ведущая роль механизма порядок-беспорядок при небольшом вкладе ионного смещения приводит к спонтанной поляризации на порядок меньшей, чем у перовскитов группы титаната бария. В сегнетофазах нелинейно-оптическая активность витлокитов эффективно контролируется химическим составом [4]. При повышении температуры ионы кальция у ряда витлокитов приобретают суперионную подвижность.

Материаловедческий потенциал семейства витлокита связан с сегнето- и антисегнетоэлектрическими свойствами в широком диапазоне температур с T_c от 450 до 1350 °С, которые реализованы в технологически доступных веществах в виде порошков, керамики, а в классе ванадатов - и крупных монокристаллах, выращиваемых по методу Чохральского. Ионно-обменные свойства позволяют применить к монокристаллам и стеклокристаллическим композитам на основе витлокитов технологию ионного темплетирования с перспективой создания интегральных оптических схем с волноводными, электрооптическими, нелинейно-оптическими и лазерными элементами. При получении последних используют люминесцирующие $\text{P}\bar{3}\bar{2}$ -катионы, упорядоченно замещающие в структуре витлокита ионы кальция. Несегрегируемое размещение гостевых катионов $\text{P}\bar{3}\bar{2}$ по различным структурным позициям обеспечивает витлокитным матрицам привлекательные спектрально-оптические характеристики с минимальным тушением люминесценции [5].

Работа поддержана грантом РФФ № 16-13-10340

ЛИТЕРАТУРА

1. Glass A.M., Abrahams S.C., Ballman A.A., Loiacono G. *Ferroelectrics* 17, 579 (1977).
2. Лазорьяк Б.И., Белик А.А., Стефанович С.Ю. Доклады РАН 384, 144 (2002).
3. Stefanovich S.Yu., Belik A.A., Lazoryak B.I., et al. *Phys. Rev. B* 70, 172103 (2004).
4. Beskorovaynaya D. A., Stefanovich S.Yu., Lazoryak B.I., et al. *Journal of Alloys and Compounds* 674, 323 (2016).
5. Deyneko D.V., Stefanovich S.Yu., Belik A.A., Lazoryak B.I. et al. *Journal of Alloys and Compounds* 647, 965 (2015).

Влияние кристаллической структуры на электрические свойства тонкопленочных PZT структур

Делимова Л.А.¹, Гущина Е.В.¹, Зайцева Н.В.¹, Павлов С.И.¹,
Серегин Д.С.², Воротилов К.А.², Сигов А.С.²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Россия
(E-mail: ladel@mail.ioffe.ru)

²Московский Технологический университет (MIREA) Москва, 119454, Россия

Тонкие сегнетоэлектрические (СЭ) пленки цирконата-титаната свинца (Pb,Zr)TiO₃ (PZT) являются перспективными материалами для создания приборов микро- и нано-электроники, в том числе элементов энергонезависимой СЭ памяти (FeRAM), полевых транзисторов (FeFET), пьезоэлектрических микроэлектромеханических систем (MEMS) и пр.

Существенным фактором, влияющим на свойства поликристаллических пленок PZT, является их кристаллическая структура. В данной работе предложен новый метод кристаллизации пленок PZT с использованием затравочного подслоя с низким содержанием Pb. На первом этапе из растворов с низким содержанием избыточного Pb (0 - 5 вес.%) формируют затравочный слой с сильной текстурой зерен перовскита Pb (111). Рост основной пленки осуществляется из раствора с 30 вес.% избытком Pb, что обеспечивает быстрое прорастание столбчатых зерен Pb и отсутствие примесной фазы пирохлора.

Показано, что затравочный слой существенно влияет на размер Pb зерна и его ориентацию, что может быть использовано для улучшения электрических характеристик пленок PZT. В частности, в таких структурах наблюдается сильная Pb (111) текстура с полным подавлением ориентации Pb (100) (см. Рис.1).

Анализ вольтамперных зависимостей переходных токов и распределений локальной проводимости методом АСМ показал, что содержание Pb и кристаллизация затравочного слоя может оказывать влияние на проводимость границ зерен Pb, которая, в свою очередь, проявляется в особенностях поляризационной зависимости переходного тока исследуемых пленок.

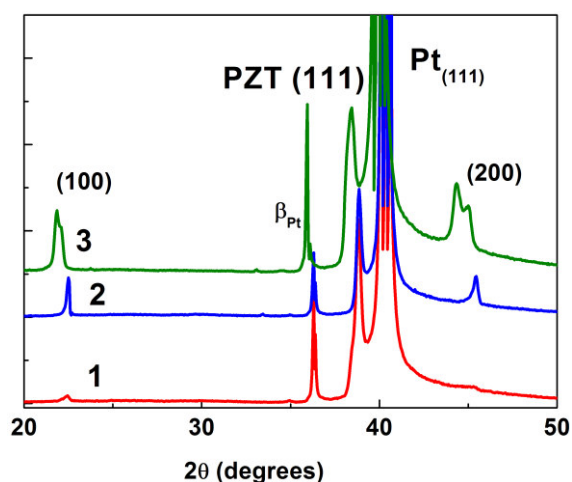


Рис. 1. Дифрактограммы PZT пленок, изготовленных (1) с кристаллизованным подслоем без избытка Pb и с фиксированным избытком Pb во всей пленке: (2) 0 вес. % и (3) 30 вес. %.

Жидкофазная рекристаллизация и особенности формирования поликристаллического ландшафта в многокомпонентных сегнетоэлектрических средах на основе ниобатов щелочных металлов

Абубакаров А.Г.¹, Нагаенко А.В.², Сайдулаев Х.Б.³, Шилкина Л.А.¹, Андрюшина И.Н.¹, Андрюшин К.П.¹, Садыков Х.А.^{4,5}, Вербенко И.А.¹, Резниченко Л.А.¹

¹Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики
(E-mail: abubakarov12@mail.ru)

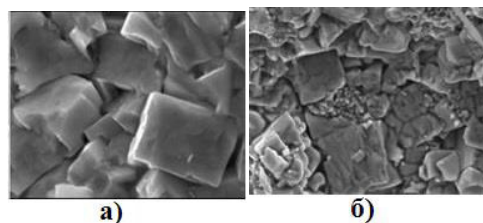
²Институт высоких технологий и пьезотехники

³Институт Наук о Земле, г. Ростов-на-Дону

⁴Чеченский государственный университет, г. Грозный

⁵Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова

Ключевыми моментами при спекании дисперсно – кристаллических порошков, из которых получают сегнетоактивную керамику, помимо уплотнения, фазовых изменений и полиморфных превращений, являются рекристаллизационные процессы, в результате которых формируется микроструктура (зёрненный ландшафт) готовых изделий. По существу, спечённые поликристаллические тела представляют собой не что иное как конгломерат зёрен (кристаллитов), границы которых образуют некую сетку межзёренных поверхностей. В докладе мы рассматриваем влияние условий фазообразования, в том числе, эффектов модифицирования на микроструктуру многоэлементных композиций на базе твёрдых растворов (ТР) ниобатов натрия, калия, лития составов $(\text{Na}_{0,46}\text{K}_{0,54})_{1-x}\text{Li}_x(\text{Nb}_{0,9}\text{Ta}_{0,1})_{1-x}\text{Sb}_x\text{O}_3$, модифицированных сверхстехиометрически и (в некоторых случаях) стехиометрически оксидами марганца, меди, никеля, висмута, железа, а также комбинированными добавками. Выбор указанных ТР обусловлен востребованностью сегнетоэлектрических керамик на основе не содержащих токсичные элементы ниобатов щелочных металлов (НЩМ) – альтернативных сред промышленно выпускаемым в мировом масштабе свинецсодержащим функциональным материалам с базовым участием ЦТС – ТР $(\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$. Исследованиями кинетики образования (синтеза, спекания) керамик установлено, что оно практически всегда происходит с участием жидкой фазы (ЖФ). При этом последняя может быть либо химически инертной по отношению к основному составу, либо активно реагировать с ним. Образование ЖФ связано с наличием непрореагировавших компонентов и легкоплавких эвтектик в шихтах ниобатов, а также присутствием в Nb_2O_5 примеси фтора. Такая жидкофазная рекристаллизация способствует формированию идеоморфных зёрен (рис. а), иногда вырастающих до гигантских размеров (вторичная прерывистая рекристаллизация) (рис. б), что приводит к саморазрушению керамик. Установлена связь между характеристиками микроструктуры и макросвойствами ТР.



Рисунок

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ), СП № 3330.2016.3 и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

Кинетика роста, пьезоэлектрические и пирозэлектрические свойства микротрубок дифенилаланина

**Васильев С.Г.¹, Нураева А.С.¹, Васильева Д.С.¹, Романюк К.Н.^{1,2},
Чезганов Д.С.¹, Есин А.А.¹, Зеленовский П.С.¹, Шур В.Я.¹,
Холкин А.Л.^{1,2}**

¹Уральский Федеральный Университет Екатеринбург, 620000, Россия
(E-mail: semen.vasilev@urfu.ru)

²Университет Авейро, Авейро, 3810-193, Португалия

В последние годы большое внимание уделяется получению биосовместимых материалов, упорядоченных на нано- и микроуровне и обладающих большими пьезоэлектрическими и пирозэлектрическими коэффициентами. Такие материалы могут использоваться как в биомедицине, для создания клеточных структур и биосенсоров, так и в микроэлектронике для разработки биосовместимых элементов. Наилучшими кандидатами для таких применений являются микро- и нанотрубки, стержни и волокна, самопроизвольно образующиеся из протеинов и пептидов за счет различных нековалентных межмолекулярных взаимодействий [1].

Исследование процесса самосборки биологических строительных блоков позволяет легко и быстро синтезировать биоорганические молекулярные кристаллы заданной геометрии с малым количеством дефектов. Особый интерес к исследованию кристаллических микротрубок ароматического дипептида дифенилаланина (ДФА) обусловлен сочетанием ярко выраженных нелинейно оптических [2] и пьезоэлектрических [3] свойств, делающим их наилучшим кандидатом для биомедицинских применений. Вместе с тем в настоящее время механизмы образования микротрубок ДФА, а также их пьезоэлектрические и пирозэлектрические свойства еще недостаточно изучены.

Кинетика роста микротрубок ДФА была исследована с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии. Полученные экспериментальные данные хорошо описываются моделью роста в условиях ограниченной диффузии. Пьезоэлектрические свойства были исследованы локально с помощью силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика. Были определены эффективные компоненты пьезоэлектрического тензора и исследована температурная зависимость коэффициента d_{15} в диапазоне температур от - 20 до 120°C. Максимальное значение коэффициента $d_{15} = 80$ пм/В сравнимо со значением пьезоэлектрического коэффициента d_{33} ниобата лития. Измерен пирозэлектрический коэффициент $p = 10^{-6}$ С/(м² К) и исследовано его поведение при изменении температуры от 30 до 90°C.

Исследование выполнено с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых (МК-2294.2017.2) и Правительства Российской Федерации (постановление 211, контракт 02.А03.21.0006).

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Gazit, The Royal Society of Chemistry **36**, 1263 (2007).
2. L. Adler-Abramovich, E. Gazit, Chem. Soc. Rev. **43**, 6881 (2014).
3. A. Kholkin, N. Amdursky, I. Bdikin, et al. ACS Nano **4**, 610 (2010).

Физические свойства новых биосегнетоэлектриков и пьезоэлектриков

Холкин А.Л.^{1,2}, Сейедхоссейни Е.³, Зеленовский П.С.², Васильев С.Г.², Копыл С.¹, Есин А.А.², Нураева А.С.², Васильева Д.С.², Шур В.Я.²

¹*Department of Physics & CICECO – Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal (E-mail: kholkin@ua.pt)*

²*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, 620000, Екатеринбург, Россия*

³*School of Engineering, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, UK*

В связи с возникшей необходимостью применения сегнетоэлектрических (СЭ) и пьезоэлектрических (ПЭ) материалов в биологии и медицине возникла острая необходимость синтеза органических кристаллов, максимально приближенных к биологическим структурам по совместимости и биологическим эффектам. В этом ряду особое место занимают аминокислоты и пептиды как основные строительные блоки более сложных биологических структур. Ранее В. В. Лемановым [1] было показано, что многие аминокислоты обладают нецентросимметричной структурой и выраженными ПЭ свойствами. Некоторые из самоорганизующихся пептидов (дифенилаланин, FF) также обладают пьезоэлектрическими свойствами, сравнимыми с неорганическими пьезоэлектриками [2], и могут использоваться в качестве биорезонаторов [3] и электрических микрогенераторов.

В настоящей работе приводятся результаты детальных исследований физических свойств двух популярных биоорганических материалов: простейшей аминокислоты глицина (бета полиморф) и пептидных микротрубок FF, выращенных из раствора. Нами впервые получены стабильные монокристаллы бета глицина [4], а также определены параметры его доменной структуры и макроскопические пьезосвойства [5]. Показано, что бета глицин является одноосным сегнетоэлектриком с характерной 180° доменной структурой и большим количеством заряженных доменных стенок. Обнаружено, что при повышенной влажности бета глицин может спонтанно превращаться в гамма полиморф [6]. Впервые исследовано переключение поляризации в самоорганизованных островках, полученных в результате центрифугирования водного раствора глицина [7]. Определен механизм роста пептидных микротрубок [8], и получены данные о матрице ПЭ коэффициентов [9], а также исследованы их пьезоэлектрические свойства [10]. Показано, что биомолекулярные СЭ и ПЭ могут использоваться в ряде устройств для биологических и медицинских применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lemanov V.V. *Ferroelectrics* **218**, 238 (2000).
2. Kholkin A.L., Amdursky N., Bdikin I., Gazit E., Rosenman G. *ACS Nano* **4**, 610 (2010).
3. Bosne E.D., Heredia A., Kopyl S. et al, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 073504 (2013).
4. Seyedhosseini E., Ivanov, Bystrov V. et al, *Cryst. Growth Des.* **14**, 2831 (2014).
5. Seyedhosseini E., Bdikin I., Ivanov M. et al. *J. Appl. Phys.* **118**, 072008 (2015).
6. Isakov D., Petukhova D., Vasilev S. et al. *Cryst. Growth Des.* **14**, 4138 (2014).
7. Seyedhosseini E., Romanyuk K., Vasileva D. et al. *ACS Appl. Mater. Inter.* (under rev.)
8. Nuraeva A., Vasilev S., Vasileva D. et al, *Cryst. Growth Des.* **16**, 1472 (2016).
9. Vasilev S., Zelenovskiy P., Vasileva D. et al, *J. Phys. Chem. Sol.* **93**, 68 (2016).
10. Esin A., Baturin I., Nikitin T. et al. *Appl. Phys. Lett.* **109**, 142902 (2016).

Широкодиапазонная ТГц-ИК спектроскопия активных диэлектриков

Командин Г.А.¹

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН Москва, 119991, Россия
(E-mail: gakomandin@mail.ru)

В работе рассмотрены современные методы экспериментального и аналитического изучения активных диэлектриков с применением методов терагерцовой (ТГц) и инфракрасной (ИК) спектроскопии.

Объединение методов ТГц и ИК спектроскопии в рамках единых правил отбора для электродипольных возбуждений позволяет проводить количественный анализ колебательного спектра в широком диапазоне температур. Широкодиапазонная ТГц-ИК спектроскопия является уникальным методом количественного изучения электродипольных характеристик нелинейно-оптических кристаллов в области дисперсии нижней поляритонной ветви.

Функция диэлектрического отклика твердых растворов чувствительна к изменениям состава, температуры и морфологии образца [1]. Данный подход дал возможность анализировать трансформации при структурных фазовых переходах, в том числе и размытых, полярных свойств и колебательного спектра сегнетоэлектриков и релаксоров синтезированных в виде монокристаллов, керамик, тонких пленок, а также и многослойных тонкопленочных гетероструктур [2]. На рисунке 1 в качестве примера приведены широкодиапазонные спектры $\varepsilon''(\nu)$ релаксорной керамики $\text{Pb}(\text{Fe}_{0,95}\text{Sc}_{0,05})_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$, в которых анализируется температурная эволюция полярных возбуждений в области размытого фазового перехода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований: гранты № 16-02-00223 и № 15-02-02335.

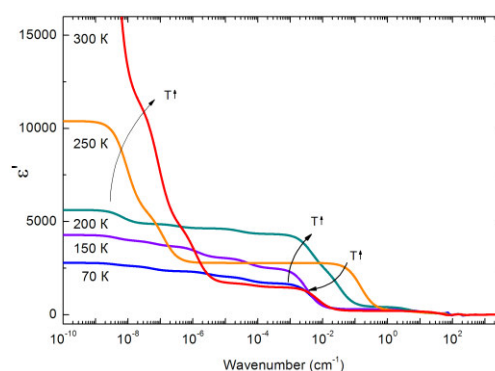


Рис. 1. Температурная зависимость широкодиапазонного спектра диэлектрических потерь $\varepsilon''(\nu)$ на примере релаксорной керамики твердого раствора $\text{Pb}(\text{Fe}_{0,95}\text{Sc}_{0,05})_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Buixaderas E., Kamba S., Petzelt J. *Ferroelectrics* **308**, 131 (2004).
2. Železný V., Soukiassian A., Schlom D.G., Xi X.X. *J. Appl. Phys.* **115**, 184102 (2014)

Механизм поляризации жидкой воды по данным диэлектрической спектроскопии

Волков А.А., Артёмов В.Г.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119923, Россия
(E-mail: aavol@bk.ru)*

Высокое значение диэлектрической проницаемости жидкой воды ($\epsilon \cong 80$) и её сильная зависимость от температуры на протяжении почти века остаются предметом интенсивных исследований. Первоначально простое представление Дебая о переориентации молекулярных диполей сменились более сложными, связанными со структурной релаксацией сетки водородных связей. Предложено большое число моделей того, как в условиях сильной связи между молекулами элементарным диполям H_2O удастся нужным образом переориентироваться. Возможности для вращения находятся в специфическом тетраэдрическом смещении молекул H_2O с одновременным поворотом [1], в сегнетоэлектрическом упорядочении молекулярных диполей [2], в специфике молекулярной динамики [3]. Всегда главным звеном механизма диэлектрической поляризации жидкой воды остается дипольный момент (1.85 Д) неделимой газовой молекулы H_2O . Проблема остается дискуссионной.

В докладе сообщается о радикально новом подходе к проблеме, исходящим из анализа панорамных диэлектрических спектров воды, Рис. 1. Методом дисперсионного анализа мы нашли в релаксационно-резонансных особенностях данных спектров признаки присущего жидкостям френкелевского диффузионно-колебательного движения частиц [4]. Дополнив модель Френкеля процессом протонного обмена между молекулами и ионами, мы построили структуру воды, динамику которой определяет диффузия частиц – нейтральных молекул H_2O и ионов H_3O^+ и OH^- , претерпевающих периодические локализации и взаимные превращения.

Модель впервые устанавливает связь между протонной проводимостью на постоянном токе (рН), дебаевской релаксацией и специфичным ИК пиком поглощения на 5 ТГц, толерантным к изотопному Н-D замещению. В рамках модели дебаевская релаксация и вместе с ней диэлектрическая проницаемость определяются биполярной диффузией ионов, циркулярное движение которых создает эффективный вращающийся дипольный момент ~ 40 Д.

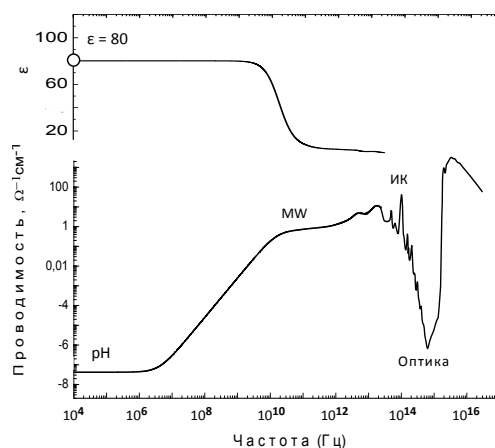


Рис. 1. Панорама диэлектрического отклика жидкой воды: диэл. проницаемость (вверху) и динамическая проводимость (внизу). Отмечены как важные свойства: диэл. проницаемость, dc- проводимость, СВЧ-поглощение, ИК спектр и оптическая прозрачность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Agmon N., J. Phys. Chem. **100**, 1072 (1996).
2. Sharma M., Resta R. and Car R., PRL **98**, 247401 (2007).
3. Del Valle J.C., Arago C., Marques M.I. et al., Ferroelectrics **466**, 166 (2014).
4. Volkov A. A., Artemov V. G. et al., EPL **106**, 46004 (2014); arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1606/1606.06023.pdf.

СТЕНДОВАЯ СЕКЦИЯ

Особенности поведения структуры $(\text{NH}_4)_3\text{VO}_2\text{F}_4$ и $(\text{NH}_4)_3\text{VOF}_5$ при фазовых переходах

Герасимова Ю.В.^{1,2}, Орешонков А.С.^{1,2}, Крылов А.С.¹, Лапташ Н.М.³

¹Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КИЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
(E-mail: jul@iph.krasn.ru)

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660074, Россия

³Институт химии ДВО РАН, Владивосток, 690022, Россия

Оксифториды образуют широкий круг соединений, представляющих значительный интерес с фундаментальной и прикладной точки зрения. Одной из особенностей этих соединений является фтор-кислородный беспорядок, который затрудняет точное определение геометрии группы $(\text{MeF}_x\text{O}_{6-x})^{3-}$. Два аммонийных оксифторванадата, $(\text{NH}_4)_3\text{VO}_2\text{F}_4$ и $(\text{NH}_4)_3\text{VOF}_5$, были исследованы спектроскопией комбинационного рассеяния света (КР) для определения природы фазовых переходов (ФП) и определении локальной симметрии оксофторкомплекса.

Динамика квазиоктаэдрических групп моделировалась в рамках полуэмпирического подхода, который определил *cis* – конформацию $\text{VO}_2\text{F}_4^{3-}$ (C_{2v}) и геометрию C_{4v} для VOF_5^{3-} . Спектры КР обоих соединений показали наличие по меньшей мере двух кристаллографически независимых октаэдрических групп, часть из которых находится в статическом равновесии, а часть динамически разупорядочена. Среди аммонийных оксифторидов, именно в этих двух комплексах кубическая фаза наблюдается при высоких температурах. ФП в $(\text{NH}_4)_3\text{VO}_2\text{F}_4$ происходит при температуре 417 К, в $(\text{NH}_4)_3\text{VOF}_5$ при 347 К. Высокотемпературная кубическая фаза этих веществ имеет пространственную группу симметрии $O_{5h} - Fm\bar{3}m$, $Z = 4$, при комнатной температуре симметрия кристаллов определена как ромбическая с пространственной группой *Immm* или $I222_1$ [1].

Наиболее выраженные структурные изменения во время ФП проявляются в КР спектрах $(\text{NH}_4)_3\text{VOF}_5$. Это уникальный случай спектральных изменений, которые до сих пор не наблюдались ни в одном оксофторэल्पасолите с аналогичной структурой. Фазовый переход в высокотемпературную фазу, $T = 349$ К, связан с переходом оксофторполиэдров в динамически разупорядоченное состояние, аммонийные группы не участвуют в этом процессе. ФП при $T = 230$ К сопровождается дальнейшим упорядочением анионной подрешетки. Октаэдрические группы и тетраэдры аммония переориентируются независимо, происходит ФП порядок-беспорядок к статическому состоянию с полностью упорядоченными октаэдрами, по крайней мере четыре независимых октаэдра VOF_5 при 230-200 К и полностью упорядочены ниже 35 К, по крайней мере семь различных октаэдров в кристаллической структуре $(\text{NH}_4)_3\text{VOF}_5$. При этой температуре происходит полное замораживание реориентационного движения аммонийных групп в $(\text{NH}_4)_3\text{VOF}_5$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-02-00920.

ЛИТЕРАТУРА

1. Molokeev M.S, Misjul S.V., Flerov I.N., and Laptash N.M. Acta Cryst. **70**, 924 (2014)

Влияние концентрации примеси на скрытую теплоту сегнетоэлектрического фазового перехода в кристаллах BaTiO_3

Магомадов Р.М., Ахматов Х.С-А., Чалаев Т.С.

*Чеченский Государственный Университет. Грозный, 364907, ул. Киевская 33, Россия
(E-mail: Rukman20031@yandex.ru)*

Тепловые аномалии в точке Кюри наиболее интенсивно изучались у сегнетоэлектриков, имеющих фазовый переход второго рода [1]. Изучение температурной зависимости теплоемкости кристаллического BaTiO_3 в температурном интервале, включающем точку сегнетоэлектрического фазового перехода, дает для скрытой теплоты разброс от 47 до (50 ± 5) кал/моль [2].

Исследование температурной зависимости теплоемкости монокристаллов BaTiO_3 проводилось на установке для дифференциально-термического и термogrавиметрического анализа «Thermoskan-2». Температурный диапазон измерений установки 25-800 °С. Установка позволяет нагревать образец со скоростями: 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10; 20 град/мин. Исследовались монокристаллы BaTiO_3 размерами (7,6,1) мм вдоль соответствующих осей X,Y,Z, весом 116,9 мГ, выращенные гидротермальным методом. Исследование кристаллов показало, что сегнетоэлектрический фазовый переход в этих кристаллах смещен вниз на $\Delta T=8\text{K}$, что свидетельствует о наличии в исследуемых кристаллах неконтролируемых примесей.

График температурной зависимости c_p в рассматриваемом интервале температур приведен на рисунке 1. Фазовый переход протекает в интервале температур $\Delta T = 4^\circ\text{C}$. Теплота, поглощаемая в этом интервале равна $\Delta Q = 7,22 \cdot 10^{-3}$ Дж. Учитывая массу образца, получаем для скрытой теплоты величину $\Delta Q = 6,18 \cdot 10^{-2}$ Дж/г, что соответствует 3,44 кал/моль. Полученная величина скрытой теплоты фазового перехода в исследуемых кристаллах BaTiO_3 меньше на порядок величин, полученных ранее для данных кристаллов [2]. Это различие связано с наличием примесей в кристалле.

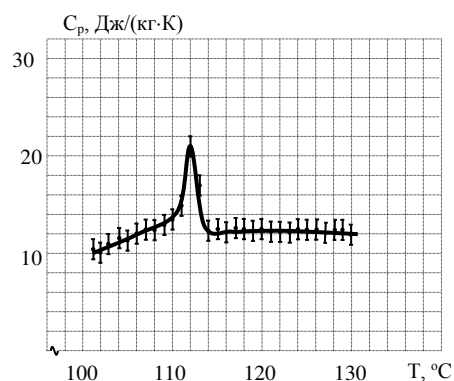


Рис. 1. Температурная зависимость теплоемкости монокристаллов BaTiO_3

ЛИТЕРАТУРА

1. Смоленский Г.А., Боков В. А., Исупов В. А. и др. *Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики*. Л.Наука. 1971 г.
2. Ф. Иона, Д. Ширане. *Сегнетоэлектрические кристаллы*. М. Мир. 1965 г.
3. Hatta J., Icuhiima A. J. Phys. Soc. Japan, v. **41**, p, 558, (1976).

Классификация феноменологических моделей фазовых переходов методами теории катастроф

Павлов С.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова Москва, 119991,
Россия (E-mail: swcusp@mail.ru)

Построение феноменологических моделей фазовых переходов (ФП) производится разложением термодинамического потенциала в ряд по степеням инвариантных комбинаций параметров порядка (ПП). На каком члене разложения оборвать ряд интуитивно ясно только для одного однокомпонентного ПП. В случае взаимодействующих или многокомпонентных ПП интуиция срывается далеко не всегда. Структурно устойчивую модель можно получить, используя эквивариантную (т.е. учитывающую симметрию ПП) теорию катастроф. При этом исходными данными для построения феноменологической модели являются только знание минимального набора базисных инвариантов ПП и число параметров, варьируемых в эксперименте (управляющих параметров). Математические методы теории катастроф (теории особенностей дифференцируемых отображений [1]) гарантируют получение структурно устойчивой модели, адекватно описывающей аномалии физических свойств вблизи точек ФП. Кроме того, данный подход позволяет классифицировать феноменологические модели для данной симметрии ПП по числу управляющих параметров. Начало такой классификации для групп симметрии ПП C_{nv} ($n=2, 3, 4, 6$) положено в [2, 3]. В данной работе приводятся результаты классификации групп ПП C_n ($n=3, 4, 6$). В таблице представлены феноменологические модели в безразмерной математической форме для группы симметрии ПП C_3 и числом варьируемых параметров c (первый столбец) от 3 до 6. Модели с $c=1, 2$ структурно неустойчивы из-за наличия инвариантов нечетных степеней. Здесь $J_1=r^2$, $J_2=r^3\cos 3\varphi$, $J_3=r^3\sin 3\varphi$, r и φ - компоненты ПП.

Таблица. Феноменологические модели с группой ПП C_3

c	F	μ
3	$a_1J_1+a_2J_2+a_3J_3+J_1^2+b_1J_2^2$	5
4	$a_1J_1+a_2J_2+a_3J_3+a_4J_1^2+J_1J_2+b_1J_1J_3+b_2J_1^3$	6
5	$a_1J_1+a_2J_2+a_3J_3+a_4J_1^2+a_5J_1J_2+J_1J_3+b_1J_2^2+b_2J_1^3$	8
6	$a_1J_1+a_2J_2+a_3J_3+a_4J_1^2+a_5J_1J_2+a_6J_1J_3+J_1^3+b_1J_2^2+b_2J_2J_3+b_3J_1^4$	10

Применение методов теории катастроф разбивает феноменологические коэффициенты на две группы: a_i и b_i . Первые (a_i) являются управляющими параметрами и зависят от внешних условий, вторые (b_i) называются в теории особенностей модулями и не зависят от внешних условий, а только определяют бифуркационный тип фазовой диаграммы. В третьем столбце указана кратность μ - максимальное число особых точек на фазовой диаграмме модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арнольд В.И., УМН, **30**, 3 (1975).
2. Изотова Т.М., Шамшин А.П., Матюшкин Э.В., Информационно-вычислительные технологии в решении фундаментальных и прикладных научных задач. М., 2004. URL: http://www.ivtn.ru/2004/physmath/enter/r_pdf/dp04_30.pdf.
3. Павлов С.В., Вестн. Моск. ун-та., сер. 3. физ. астрон., № 5, 37. (2016).

Исследования особенностей фазовых переходов в твёрдых растворах системы $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ ($0,02 \leq x \leq 0,3$)

Захаров Ю.Н.¹, Лутохин А. Г.¹, Сарычев Д.А.¹, Спиваков А.А.¹

¹Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: aleksander_spivakov@mail.ru)

Методами диэлектрической спектроскопии и измерений пирозлектрических свойств в динамическом и квазистатическом режимах исследована фазовая диаграмма системы твёрдых растворов $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ ($0,02 \leq x \leq 0,3$). Установлено, что на фазовой границе $R3m \leftrightarrow R3c$ существует трикритическая точка при $x \approx 0,17$, в которой фазовый переход первого рода между данными фазами сменяется переходом второго рода. В рамках феноменологической теории фазовых переходов даётся объяснение необычной, куполообразной, форме этой фазовой границы. Для этого был построен модельный термодинамический потенциал, учитывающий особенности фазовых границ $R3m \leftrightarrow R3c$ и выполненна аппроксимация для коэффициентов термодинамического потенциала, учитывающая, в частности, установленное на основе кристаллохимических и термодинамических соображений, моно-тонное уменьшение температуры фазового перехода типа “tilting” с ростом концентрации титаната свинца [1] и другие экспериментальные результаты. Выполнено численное моделирование, позволившее добиться (см. рис. 1), количественного согласования результатов теоретического описания с экспериментальными данными и наблюдаемыми особенностями фазовой диаграммы.

Комплексные исследования диэлектрических и пирозлектрических свойств в интервале концентраций $0,02 \leq x \leq 0,08$ показали, что в образцах с $x = 0,06$ и $0,07$ при нагреве и охлаждении осуществляется следующая последовательность обратимых фазовых переходов: при нагреве сначала происходит фазовый переход из антисегнетоэлектрической фазы $Pbam$ в сегнетоэлектрическую ромбоэдрическую фазу с симметрией $R3c$, который проявляется в ярко выраженном скачке диэлектрической проницаемости. Затем наблюдается фазовый переход между двумя ромбоэдрическими сегнетоэлектрическими фазами $R3m$ и $R3c$, который сопровождается пиком на зависимости пиротока в динамическом режиме измерения. Отсутствие фазового перехода $Pbam \leftrightarrow R3c$ в образце с $x = 0,08$ свидетельствует о наличии вертикальной границе между этими фазами, которая должна находиться в интервале $x = 0,07 \dots 0,08$.

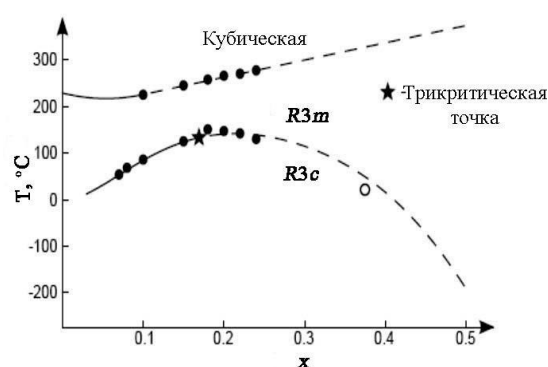


Рис. 1. Фазовая диаграмма твёрдых растворов системы $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ в интервале концентраций $x = 0,07 \dots 0,5$, построенная в соответствии с феноменологической моделью. Чёрные точки – экспериментальные данные, полученным нами, незакрашенная точка – экспериментальные данные из работы [2]; сплошные и пунктирные линии, обозначающие фазовые переходы первого и второго рода, построены в рамках феноменологической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Spivakov, Yu.N. Zakharov, N.V. Ter-Oganessian, A.G. Lutokhin, E.M. Panchenko, V.P. Sakhnenko., Solid State Sciences **40**, 105 (2015).
2. D. L. Corkery, A. M. Glazer et al., J. Phys.: Condens. Matter **10**, 6251 (1998).

Моделирование фазового перехода в KDP методом Монте-Карло

Абалмасов В.А.

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия
(E-mail: abalmassov@iae.nsk.su)*

Сегнетоэлектрический фазовый переход в кристалле KDP обусловлен упорядочением протонов в двухминимумном потенциале вдоль водородной связи, что позволяет свести его математическое описание к модели типа Изинга. Точное решение модели Изинга в трёхмерном случае неизвестно, поэтому на практике используют различные модификации приближения среднего поля. В случае KDP наиболее подходящим является четырёх-частичное кластерное приближение [1], которое хорошо описывает экспериментальные данные.

Метод Монте-Карло применялся ранее для вычисления критической температуры фазового перехода в рамках псевдоспиновой модели KDP [2], но используемые параметры были несколько отличны от традиционной модели Слатера-Такаги.

Мы вычисляем методом Монте-Карло термодинамические величины в окрестности фазового перехода в кристалле KDP (пренебрегая туннелированием протонов на водородной связи) для кубического образца из 1000 элементарных ячеек по 8 спинов в каждой, используя периодические граничные условия, при числе шагов от 40 до 100 тысяч на спин. Используемое нами соотношение параметров Слатера-Такаги $\omega/\varepsilon = 8.5$ наилучшим образом соответствует экспериментальным данным [3]. Параметр дальнего действия γ полагаем равным нулю, что в кластерном приближении приводит к фазовому переходу второго рода. Мы отмечаем очень хорошее согласие для полученной нами зависимости среднего спина (параметра порядка) от температуры с приближением метода кластеров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-02-04950.

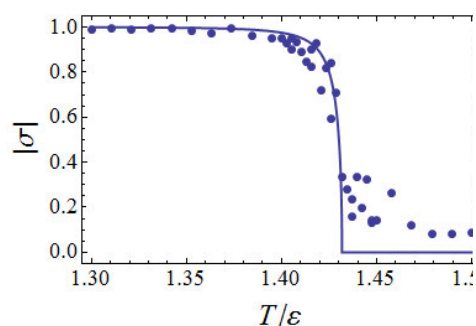


Рис. 1. Среднее абсолютное значения параметра порядка в KDP в зависимости от температуры (в единицах параметра Слатера), полученное методом Монте-Карло (точки) и в кластерном приближении (линия)

ЛИТЕРАТУРА

1. Blinc R. and Svetina S., Phys. Rev. **147**, 430 (1966).
2. Pawley G.S. and Tibballs J.E., Ferroelectrics Letters **44**, 33 (1982).
3. Абалмасов В.А., Пугачёв А.М., Суровцев Н.В., ФТТ **53**, 1301 (2011).

Температурные эволюции коэффициентов в разложении свободной энергии кристалла Rb_2ZnCl_4 по поляризации методом гармонического анализа

Горбатенко В.В.¹, Прасолов Б.Н.², Горбатенко С.А.²

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж, 394026, Россия
(E-mail: vlgorbatenko@rambler.ru)

² Научно-производственная фирма "Сенсор", Воронеж, 394026, Россия

Согласно теории Ландау-Девоншира [1,2] в случае одноосного сегнетоэлектрика можно разложить свободную энергию W_C по степеням единственной компоненты поляризации P_C . Использование теории Ландау-Девоншира для количественных оценок результатов измерений поляризационных свойств модельного кристалла группы A_2BX_4 — хлорцинка рублидия Rb_2ZnCl_4 применимо в том случае, если свободную энергию W_C раскладывать по степеням единственной компоненты поляризации, ограничиваясь членами до четырнадцатой степени [3]. Таким образом, ограничиваясь членами до четырнадцатой степени по поляризации, имеем:

$$W_C = \frac{1}{2} aP_C^2 + \frac{1}{4} bP_C^4 + \frac{1}{6} cP_C^6 + \frac{1}{8} dP_C^8 + \frac{1}{10} eP_C^{10} + \frac{1}{12} fP_C^{12} + \frac{1}{14} gP_C^{14} - EP_C, \quad (1)$$

где a, b, c, d, e, f, g - коэффициенты, имеющие определенный физический смысл [4], E – напряженность электрического поля.

Известно, что равновесная конфигурация определяется нахождением минимума $W_C(P_C)$. Это уравнение дает выражение для электрического поля E , как функции поляризации при использовании в разложении семи членов P_C :

$$E = aP_C + bP_C^3 + cP_C^5 + dP_C^7 + eP_C^9 + fP_C^{11} + gP_C^{13}. \quad (2)$$

В теории Ландау-Девоншира предполагается, что в окрестности точки Кюри ($T \approx T_C$) коэффициент a изменяется с температурой. Другие коэффициенты в разложении свободной энергии не зависят от температуры [1,2,4].

В настоящей работе методом гармонического анализа [5] была проверена справедливость данного предположения при исследовании поляризационных свойств кристалла Rb_2ZnCl_4 . Были определены и сопоставлены между собой величины коэффициентов a, b, c, d, e, f и g из выражений 1 и 2, а также исследованы их температурные эволюции в окрестности температуры T_C в сегнетоэлектрической фазе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. *Статистическая физика*. М.: Наука (1976).
2. A.F. Devonshire. *Theory of Ferroelectrics*. Adv. Phys. 3, 85 (1954).
3. В.В. Горбатенко, Б.Н. Прасолов // Изв. РАН. Сер. физ. **80**, №9, 1255 (2016).
4. К.М. Рабе, Ч.Г. Ана, Ж.-М. Трискона. *Физика сегнетоэлектриков (современный взгляд)*. Пер. с англ. Б.А. Струкова и А.И. Лебедева. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний (2011).
5. В.В. Горбатенко, Б.Н. Прасолов, В.И. Кудряш, С.А. Горбатенко // Изв. РАН. Сер. физ. **74**, №9, 1294 (2010).

Квантовохимический анализ особенностей структурного фазового перехода в квазиодномерных сегнетоэлектриках $\text{Pb}(\text{H/D})\text{PO}_4$

Долин С.П., Бреславская Н.Н., Михайлова Т.Ю.

Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН Москва, 119991, Россия (E-mail: dolin@igic.ras.ru)

В рамках псевдоспиновой модели Изинга с учетом эффектов туннелирования и дальнего действия рассмотрены термодинамические особенности структурного фазового перехода (СФП) в гидрофосфате свинца и его дейтероаналоге [1]. Для определения необходимых для анализа СФП численных оценок параметров псевдоспинового гамильтониана (ПСГ) – слейтеровских интегралов и интегралов туннелирования – применена методика, основанная на независимом квантово-химическом способе их нахождения [2,3].

Предложена упрощенная схема выбора модельных кластеров с различным (4-16) числом H-связей, позволяющая в расчетах потенциальных профилей и параметров Изинга применять квантово-химические методы высокого уровня (CCSD/6-311+G** и др.). Результаты расчетов обсуждены в рамках двух статистических моделей – в приближении молекулярного поля и в приближении метода кластеров Бете. Получены оценки критической температуры перехода T_c для обеих систем и показано, что только в рамках кластерного подхода возможно полуколичественное ($\approx 90\%$) воспроизведение экспериментальных данных. Представлено объяснение наблюдаемому изотопному эффекту, связанному с заметным повышением T_c при дейтерировании и продемонстрирована определяющая роль эффектов туннелирования в случае PbHPO_4 , а также необходимость при выборе модельных кластеров для обоих кристаллов точного учета различий в геометрических параметрах H-связей, включая их взаимную ориентацию. Предложенный подход позволяет с практически такой же точностью описать барическое поведение (понижение величин T_c) обоих сегнетоэлектрических материалов [4,5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Negran T.J., Glass A.M., Brickenkamp C.S. et al, *Ferroelectrics* **6**, 179 (1974).
2. Levin A.A., Dolin S.P., *J.Mol.Struct.*, **552**, 39 (2000).
3. Dolin S.P., Mikhailova T.Yu., Levin A.A., *Int.J.Quant.Chem.*, **107**, 2409 (2007).
4. Katrusiak A., Nelmes R.J., *J.Phys.Condens.Matter*, **1**, 10165 (1989).
5. McMahan M.I., Nelmes R.J., Kuhs W.F. et al, *Nature*, **348**, 317 (1990).

Изучение электромеханического гистерезиса в полимерных сегнетоэлектрических материалах методами компьютерного моделирования

Егоров В.И.¹, Герасимов Р.А.², Петрова Т.О.², Максимова О.Г.¹,
Максимов А.В.¹

¹Череповецкий государственный университет, Череповец, 162600, Россия
(E-mail: rvladegorov@rambler.ru)

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

Явление пьезоэффекта в сегнетоэлектриках широко используется при создании различных датчиков и преобразователей в радио- и акустоэлектронике, нелинейной оптике и др. перспективных областях науки и техники. В настоящее время в данной области растет применение новых высокомолекулярных материалов, которые успешно конкурируют с неорганическими сегнетоэлектриками.

В данной работе проведено компьютерное моделирование деформации полимерных сегнетоэлектрических материалов, наблюдаемое в переменных электрических полях (обратный пьезоэффект). Для описания взаимодействий между сегментами полимерных цепей был использован потенциал Штокмайера, представляющий собой потенциал Леннарда-Джонса с дополнительным слагаемым, учитывающим дипольные взаимодействия между ближайшими сегментами (энергия Кеезома). Методом Монте-Карло с применением алгоритма Метрополиса при заданной температуре на каждом шаге изменения внешнего электрического поля определена равновесная конфигурация системы; рассчитаны зависимости поперечной деформации от величины электрического поля (рис. 1). Исследовано влияние температуры, частоты электрического поля, а также величины энергетических параметров, характеризующих внутри- и межцепные взаимодействия, на форму гистерезисной кривой.

Результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными данными, полученными при исследованиях обратного пьезоэффекта в сегнетоэлектриках [1, 2].

Работа выполнена в рамках гранта РНФ «Методы микроструктурного нелинейного анализа, волновой динамики и механики композитов в исследовании и дизайне современных метаматериалов и элементов конструкций на их основе» (№ 15-19-10008).

ЛИТЕРАТУРА

1. Burcsu E., Ravichandran G., Bhattacharya K. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 1698 (2000).
2. Bertotti G., Mayergoyz I.D. *The Science of Hysteresis*, Academic Press (2005).

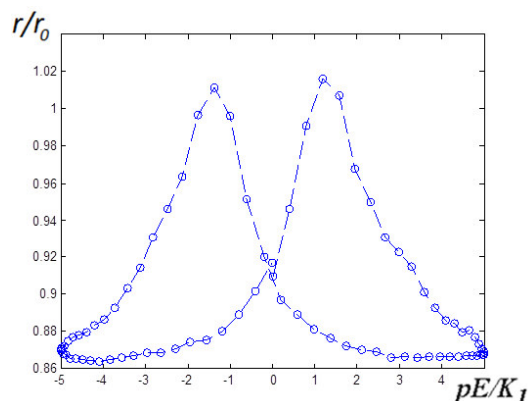


Рис. 1. Кривая электромеханического гистерезиса – зависимость относительной поперечной деформации системы r/r_0 (r_0 – первоначальная толщина системы) от величины внешнего электрического поля pE/K_1 , где p – дипольный момент сегмента цепи, K_1 – энергетический параметр внутрицепных взаимодействий

Первопринципные исследования поляризационных, магнитных, оптических и электронных свойств двойных перовскитов LaPbTSbO_6 ($T=\text{Fe, Ni, Co}$)

Жандун В.С. и Зиненко В.И.

*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ
“Красноярский научный центр СО РАН” Красноярск, 660036, Россия
(E-mail: jvc@iph.krasn.ru)*

В рамках теории функционала плотности, реализованного в пакете VASP, проведен расчет динамики решетки, магнитных, оптических и электронных свойств упорядоченных двойных перовскитов LaPbFeSbO_6 , LaPbCoSbO_6 и LaPbNiSbO_6 с шахматным (RR) и слоистым (LL) упорядочением обоих катионов. Расчет динамики решетки показал наличие мягких мод в спектре колебаний решетки, искажение по собственным векторам нестабильных мод колебаний приводит к полярным низкосимметричным фазам. Впервые получены дисперсионные зависимости оптических коэффициентов и диэлектрической функции для этих соединений. Получено, что в зависимости от типа магнитного иона реализуются, как различные магнитные конфигурации, так и различные электронные структуры. Так, например, в структуре с шахматным упорядочением катионов, LaPbFeSbO_6 и LaPbCoSbO_6 являются антиферромагнитными диэлек-

триками, тогда как LaPbNiSbO_6 – ферромагнитный диэлектрик. При слоистом упорядочении обоих катионов LaPbFeSbO_6 и LaPbNiSbO_6 проявляют ферромагнитные и металлические свойства, в соединении LaPbCoSbO_6 , в свою очередь, наиболее выгодным является антиферромагнитная конфигурация магнитных моментов и в электронной структуре наблюдается диэлектрическая щель. Таким

образом, предполагается корреляция между типом атомом переходного металла на позиции катиона В (числом d-электронов на данном атоме) и магнитными, электронными и оптическими свойствами соединений, что дает возможность создавать материалы с заданными физическими свойствами, управляя химическим составом и упорядочением катионов. Также проведено исследование влияния беспорядка на магнитные и электронные свойства данных соединений, показывающее зависимость физических свойств исследуемых двойных перовскитов от степени химического порядка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края рамках научного проекта № 17-42-240844

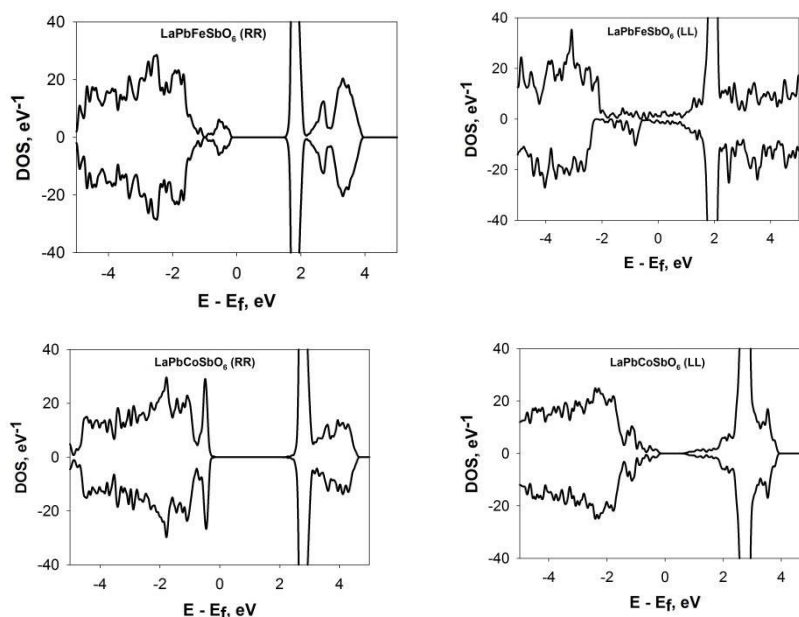


Рис. 1. Плотности электронных состояний (DOS) соединений LaPbFeSbO_6 (верхняя панель) и LaPbCoSbO_6 (нижняя панель) для разных вариантов упорядочения катионов

Магнитные, магнетоэлектрические и электронные свойства шпинелей $MnGa_2O_4$ и $CoRh_2O_4$

Жандун В.С., Немцев А.В. и Зиненко В.И.

*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ
“Красноярский научный центр СО РАН” Красноярск, 660036, Россия
(E-mail: jvc@iph.krasn.ru)*

Соединения со структурой шпинели с общей формулой AB_2O_4 привлекают внимание научного сообщества в связи с многообразием физических свойств, возникающих в этих соединениях в зависимости от химического состава и упорядочения катионов. Одним из наиболее перспективных и интересных является наличие магнетоэлектрического эффекта в шпинелях, содержащих магнитные ионы в структуре. В структуре шпинели имеются 2 неэквивалентные катионные позиции А (тетраэдрическая) и В (октаэдрическая), таким образом, замещение катионов на данных позициях (немагнитный ион на магнитный и наоборот) может приводить к изменениям магнитных и магнетоэлектрических свойств. В данной работе в рамках DFT подхода проведено теоретическое исследование магнитных, поляризационных и магнетоэлектрических свойств ряда соединений со структурой шпинели, а также исследовано влияние замещения катионов и эффект беспорядка на физические свойства. Получено основное магнитное состояние и константы обменного взаимодействия. Экспериментально установленное наличие спонтанной поляризации в данных соединениях подтверждается первопринципными расчетами. и исследованы механизмы возникновения магнетоэлектрического эффекта в рассмотренных соединениях.

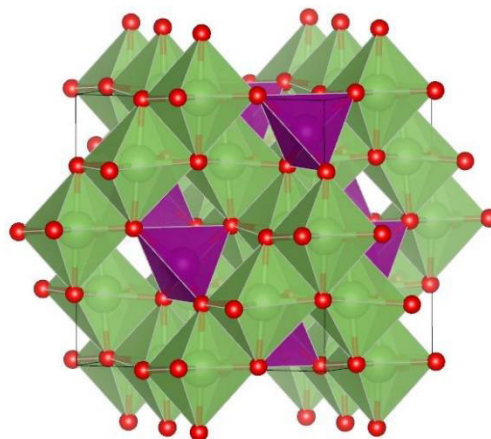


Рис. 1. Структура шпинели

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края рамках научного проекта № 17-42-240844

Формирование конденсата параметров порядка в манганитах AMnO_3 ($A = \text{La, Pr, ...}$) при фазовых переходах с образованием изосимметричных фаз

Ивлиев М.П.

*НИИ физики при Южном Федеральном Университете, Ростов-на-Дону, 344090,
Россия (E-mail: ivlievmp@rambler.ru)*

На основе феноменологической теории исследовано формирование конденсата параметров порядка (ПП) при ротационных и ян-теллеровских фазовых переходах в манганитах группы лантана. Манганиты с общей структурной формулой ABX_3 имеют простую кубическую решетку с симметрией $\text{Pm}\bar{3}\text{m} - \text{O}_h^1$ ($Z=1$). Ротационные упорядочения характеризуются двумя ПП. Один из них – ϕ преобразуется по неприводимому представлению (НП) R_4^+ , другой – ψ по НП M_3^+ . Упорядочение октаэдров MnO_6 , деформированных вследствие эффекта Яна-Теллера, (орбитальное упорядочение) характеризуется ПП χ , который преобразуется по НП M_2^+ .

В LaMnO_3 при $T \geq 1010$ К устойчива ромбоэдрическая фаза R симметрии $\text{R}\bar{3}\text{c}$ (ффф), при $750\text{K} < T < 1010\text{K}$ устойчива ромбическая фаза O с симметрией Pbnm (ффψ). При $T < 750\text{K}$ устойчива ромбическая фаза O' с симметрией Pbnm , в которой наряду с ротационным упорядочением появляется и орбитальное. Аналогичная последовательность фаз наблюдается и в других манганитах.

Показано, что фазовый переход (ФП) из кубической в фазу R связан с конденсацией трёх компонент ПП ϕ , а переход между фазами R и O обусловлен конденсацией ПП ψ и заменой ϕ_3 на ψ_3 . Такая замена возможна при наличии сильного косвенного взаимодействия между параметрами ϕ и ψ через смещения катионов A. Параметр порядка ξ (НП X_5^+), описывающий смещения катионов A, возникает как псевдособственный вследствие билинейной связи ПП ξ с ПП ψ при $\phi \neq 0$. Смещения катионов A, сопровождающие появление ψ_3 , создают поляризацию плоскостей AO_2 , ортогональных оси z , вдоль направлений типа $x = y$. При этом поляризации соседних по z плоскостей направлены в противоположные стороны.

Согласно экспериментальным данным деформации октаэдров MnO_6 наблюдаются при $T \gg T_{\text{JT}}$ (T_{JT} – температура орбитального фазового перехода). Поэтому орбитальный ФП рассматривается как переход типа «порядок-беспорядок», обусловленный ориентационным упорядочением деформированных октаэдров по трём направлениям. В этом случае конденсироваться будет только одна компонента ПП χ , также показано, что при соответствующих условиях ФП будет переходом I –го рода.

Взаимодействие ротационных и орбитального параметров порядка таково, что при наличии двух компонент ПП ϕ параметры ψ_3 и χ_3 связаны билинейно. Соответственно конденсация критического параметра ψ_3 приведёт к появлению (как псевдособственного) параметра χ_3 . Т.о. конденсат, характеризующий фазу O в лантаноидных манганитах, будет $\phi\phi\psi_3\chi_3$ и $0000\xi\xi$. В ряде работ отмечалось наличие «остаточного квадрупольного упорядочения» (т.е. $\chi_3 \neq 0$) при $T > T_{\text{JT}}$.

Фазовый переход из фазы O в фазу O', обусловленный собственно орбитальным упорядочением, оказывается переходом во внешнем поле, которое определяется произведением $\phi\phi\psi$. Конденсат ПП в фазе O' такой же, как в фазе O. Обе фазы имеют одинаковую симметрию, т.е. изосимметричны. Разница в том, что в фазе O влияние параметра χ_3 незначительно, а в фазе O' основной структурный мотив формируется именно орбитальным упорядочением.

Применение кристаллографического сервера Бильбао для изучения структурных фазовых переходов в сегнетоэлектриках

Крылова С.Н.

Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН Красноярск, 660036, Россия (E-mail: slanky@kfti.knc.ru)

Фазовый переход в сегнетоэлектрическое состояние можно рассматривать с точки зрения устойчивости кристаллической решетки по отношению к некоторым нормальным колебаниям. Прежде всего, существенным отличием сегнетоэлектрических кристаллов является то, что в их колебательном спектре должно присутствовать тесно связанное с сегнетоэлектрическими свойствами кристалла нормальное колебание, характеризующееся весьма низкой частотой. Другой особенностью сегнетоэлектрических кристаллов является то, что вблизи частоты этого колебания должна находиться область глубокой дисперсии диэлектрической проницаемости, которая, например, в случае кристалла BaTiO₃ должна меняться почти на два порядка. [1] Другими словами, в этом районе спектра коэффициент поглощения должен быть очень велик, а соответствующая полоса поглощения должна иметь размытый вид. Основными методами исследования колебательных спектров кристаллов являются измерения спектров инфракрасного поглощения и комбинационного рассеяния света в кристаллах. Обычно используют оба этих метода, так как они могут дополнять друг друга. С помощью оптических методов можно изучать только оптические ветви нормальных колебаний и при том только при значениях волнового числа 0. Рассеяние нейтронов позволяет экспериментально изучать полные дисперсионные зависимости. Для грамотной интерпретации экспериментальных колебательных спектров и для предсказания возможных низкосимметричных фаз необходимы кристаллографические данные кристалла, которые можно получить из кристаллографических таблиц [2], а можно воспользоваться сервером Бильбао [3].

Кристаллографический сервер Бильбао - вебсайт с кристаллографическими программами и базами данных, доступными on-line. Программы дают доступ к общей информации, относящейся к пространственным группам (позиции, неприводимые представления, позиции Уайкофа), к парам группа-подгруппа пространственных групп и результаты по структуре кристаллов. Утилиты программ можно применять к проблемам фазовых переходов, относящихся к структурной псевдосимметрии. К программам можно получить доступ с главной страницы сервера (www.cryst.ehu.es). Сервер содержит информацию только по 230 кристаллографическим группам.

Автор выражает благодарность за финансовую поддержку Российскому Фонду Фундаментальных Исследований грант 16-02-00102

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурзин В. Н., Пасынков Е., Соловьев С. П., УФН **92**, 427 (1967).
2. Dimza V.I., Strogis A.A., Kapenieks A.E. et al., Ferroelectrics **90**, 45 (1989).
3. Kroumova E., Aroyo M. I., Perez Mato J. M., Kirov A., Capillas C., Ivantchev S. & Wondratschek H. "Bilbao Crystallographic Server: useful databases and tools for phase transitions studies" Phase Transitions **76**, Nos. 1-2, 155 (2003).

Обобщение формулы Максвелла-Гарнетта на случай сегнетоэлектриков

Старков А.С.¹, Пахомов О.В.¹, Старков И.А.², Дедык А.И.³,
Мыльников И.Л.³

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО
Санкт-Петербург, 197101, Россия

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет,
Санкт-Петербург, 194021, Россия

³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, 197376, Россия (E-mail: mylnikov.il@gmail.com)

Из множества формул для эффективной диэлектрической проницаемости смеси наиболее часто используется формула Максвелла-Гарнетта [1], которая имеет простой наглядный физический смысл. Для расчёта свойств новых композитных материалов на основе сегнетоэлектриков эта формула непригодна, что делает весьма актуальной задачу о нахождении аналога этой формулы при нелинейной зависимости поляризации P от электрического поля E . Для термодинамического описания сегнетоэлектриков, как правило, используют свободную энергию Гиббса F , которая в теории Гинзбурга-Ландау представляется полиномом относительно P^2 :

$$F = \frac{aP^2}{2} + \frac{bP^4}{4} + \frac{cP^6}{6} + \varepsilon_0 \nabla \varphi P + \varepsilon_0 \frac{(\nabla \varphi)^2}{2} \quad (1)$$

Здесь φ – потенциал электрического поля, ε_0 – электрическая постоянная, a , b , c – коэффициенты Гинзбурга-Ландау. В соответствии с формулой (1) диэлектрическая восприимчивость χ задается соотношением:

$$\chi(P) = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial P}{\partial E} = \frac{1}{a + 3bP^2 + 5cP^4} \quad (2)$$

Вначале рассматривается задача об электрическом поле для сегнетоэлектрического шара (наполнителя) из материала 2, погружённого в матрицу из материала 1. Считается заданным внешнее электрическое поле E_{ext} . В отличие от линейного случая решение электростатической задачи удаётся найти только при малом внешнем поле E_{ext} . Обозначим через E_2 напряжённость электрического поля в шаре и через P_{10} – поляризацию в матрице. На основе решения задачи с единичным шаром по стандартной методике ([1]) находится эффективная диэлектрическая проницаемость для смеси, в которой объёмная доля второго сегнетоэлектрика составляет f . В результате получаем следующее обобщение формулы Максвелла-Гарнетта на случай сегнетоэлектриков

$$\chi_{eff} = (1-f)\chi_1(E_{ext}) + f\chi_2(E_2) \frac{3\varepsilon_1(P_{10})}{\varepsilon_2(E_2) + 2\varepsilon_1(P_{10})} \quad (3)$$

Для проверки формулы (3) были проведены измерения диэлектрической проницаемости для смеси BaTiO₃ и Mn при различном процентном содержании Mn. Результаты эксперимента подтвердили высокую точность формулы (3) для $f < 0.3$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60189 мол_а_дк.

ЛИТЕРАТУРА

1. Garnett J. C. M. II Phil. Trans. Royal Soc. of London. Series A **205**, (1906).
2. Correia, Tatiana, and Qi Zhang. *Electrocaloric Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer, (2014).

Определение температурной зависимости параметров кристаллической решетки, спонтанной деформации и поляризации при фазовом переходе $m3mF4mm$

Непочатенко В.А., Непочатенко И.А.

Белоцерковский национальный аграрный университет, Белая Церковь, 09117, Украина
(E-mail: vnepochatenko@gmail.com)

Предложен метод определения температурных зависимостей параметров кристаллической решетки сегнетоэлектриков со структурным фазовым переходом $m3mF4mm$, Метод основан на условии сохранения макросимметрии параэлектрической фазы при фазовом переходе в полидоменном кристалле [1].

Рассмотрены случаи формирования в кристалле структурных фазовых переходов второго и первого рода. Для фазового перехода второго рода (T_{01}) получена система двух уравнений, которая имеет три решения для каждого параметра тетрагональной фазы. Если в кристалле формируется фазовый переход первого рода при температуре T_{02} , то температуре T_{01} ($T_{01} > T_{02}$) соответствует гипотетический фазовый переход второго рода, который определяет температурную зависимость параметров решетки как в тетрагональной фазе, так и в ее зародышах.

Анализ полученных решений сделан на примере фазового перехода в $BaTiO_3$. Получено, что одна пара решений системы уравнений соответствует экспериментальным значениям [2] параметров решетки в тетрагональной фазе $BaTiO_3$ (рис.1). Из этих функциональных зависимостей определены температурные зависимости спонтанной деформации $e_{ij}^s(t)$. Установлено, что величина спонтанной поляризации $P_s(t)$ зависит от температур двух фазовых переходов (T_{01} и T_{02}) (рис. 2)

$$P_s(t) = k_1(T_{02} - t)^\beta \cdot \sqrt{e_{33}^s(t)}. \quad (1)$$

Предложен метод вычисления температуры и температурного гистерезиса при фазовом переходе первого рода.

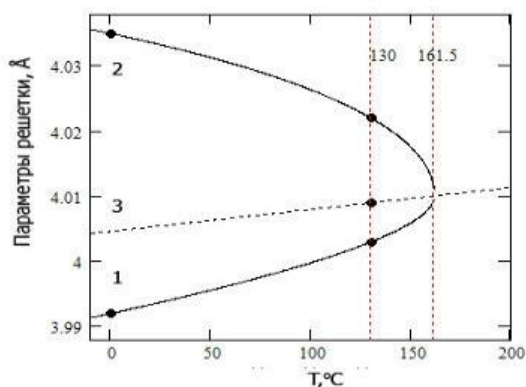


Рис. 1. Температурная зависимость параметров решетки $a_1(1)$, $c_1(2)$, $a_c(3)$

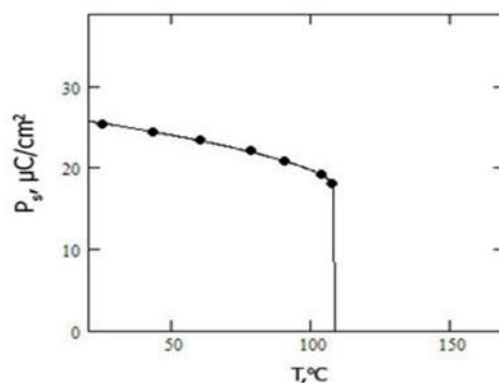


Рис. 2. Температурная зависимость спонтанной поляризации

ЛИТЕРАТУРА

1. Shuvalov L.A. J. Phys. Soc. Japan Suppl, **28**, 38 (1970).
2. Y.M. Chiang, D.P. Birnie, W.D. Kingery, Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering, John Wiley and Sons, New York (1997).

К вопросу математического моделирования поляризации поликристаллических сегнетоэлектриков

Скалиух А.С.¹, Ли Гуоронг²

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344103, Россия
(E-mail: a.s.skaliukh@gmail.com)

²Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 1295 Dingxi Road, Shanghai, China 200050

Моделирование поляризации поликристаллических сегнетоэлектриков связано с рассмотрением нелинейных и необратимых процессов, описываемых обратимыми и необратимыми параметрами. Наиболее трудной задачей является построение приращений необратимых параметров [1], в силу изменяющейся структуры материала.

В работе предложена математическая модель поляризации и деполяризации поликристаллических сегнетоэлектрических материалов при одновременном воздействии электрического поля и механических напряжений в трехмерном случае. Она является обобщением модели для квазистатического процесса, предложенной в [2], где были использованы основные положения поляризации диэлектриков, молекулы которых обладают постоянным электрическим моментом [3]. В предлагаемой модели использован принципиально новый подход, который опирается на ориентационную модель с энергетическим критерием переключения доменов. В случае переключения только 180-градусных доменов предложенная форма энергетического критерия дает хорошо известное условие модели Прейзаха [4]. С учетом затухания, энергии переключения доменов, и работы внешних полей, строится балансное энергетическое соотношение, из которого выводится искомая система уравнений в дифференциалах. Параметры модели определяются из условия совпадения расчетных кривых с экспериментальными данными. Пример малых петель гистерезиса, полученных с помощью нашей модели, показан на рис. 1.

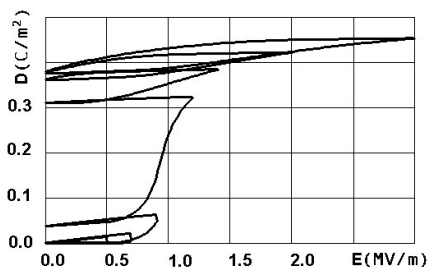


Рис. 1. Малые петли диэлектрического гистерезиса.

Преимущества модели состоят в доменном представлении структуры материала и физики их переключений в 3-х мерном случае. Модель позволяет оценить погрешности одномерных моделей, а также может быть использована при нахождении коэффициентов затухания для циклических процессов. Но она имеет и свои недостатки, заключающиеся в достаточно большом объеме хранимой информации, особенно при конечно-элементном моделировании необратимых процессов.

Работа выполнена в рамках выполнения конкурсной части государственного задания Минобрнауки России по проекту № 9.1001.2017/ПЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоконь А.В., Скалиух А.С. *Математическое моделирование необратимых процессов поляризации*. М.: Физматлит. (2010).
2. Smith R.C., Ounaies Z., J. Intelligent Mater. Syst. and Struct. **11** № 1, 62 (2000).
3. Тамм И.Е. *Основы теории электричества*. М.: Наука. (1966).
4. Preisach F. *Zeitschrift für Physik*. **94**, 277 (1935).

Сравнительный анализ электронной структуры и диэлектрической восприимчивости кристаллов α -TeO₂ и β -TeO₃

Смирнов М.Б.¹, Рогинский Е.М.²

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Санкт-Петербург, Россия

(E-mail: smirnob@rambler.ru)

Высокая оптическая нелинейность оксидов теллура, как в кристаллическом, так и в стеклообразном состоянии уже более 20 лет привлекает внимание исследователей, занятых поиском материалов для создания новых оптоэлектронных устройств. Наибольшее внимание уделялось кристаллической модификации α -TeO₂ (парателлуриту) вследствие его выдающихся оптоакустических, пьезоэлектрических и электрооптических свойств. Затем внимание исследователей повернулось к другим оксидам теллура. Атомы теллура поливалентны – могут быть в состояниях Te⁴⁺ и Te⁶⁺. Это открывает возможность существования устойчивых соединений с формулой TeO_x, где 2 ≤ x ≤ 3. Неэмпирические расчеты показали, что крайний член этого семейства кристалл β -TeO₃ обладает нелинейной восприимчивостью третьего порядка в 10 раз большей, чем у парателлурита [1]. Однако, экспериментального подтверждения этой гипотезы до сих пор не последовало, а корректность использованных в [1] вычислительных методов вызывает большие сомнения.

В данной работе сообщается об экспериментальной оценке ширины запрещенной зоны кристалла β -

Table 1: Диэлектрическая восприимчивость и ширина запрещенной зоны (в eV): расчет и эксперимент.

	α -TeO ₂		β -TeO ₃	
	E_g	χ^1	E_g	χ^1
Exp.	3.50	4.05	3.20	4.11
LDA	2.82	5.32	1.50	4.11
LDA+U	3.26	4.42	2.27	3.42
GWA	3.68	3.34	2.74	2.46

TeO₃ и определены способы расчета, дающие сравнимые с экспериментом значения структурных, динамических и диэлектрических характеристик. Установлено, что нелинейная восприимчивость кристалл β -TeO₃ вдвое меньше, а запрещенная зона значительной уже, чем у парателлурита. Показано, что такой парадоксальный феномен можно объяснить ролью 5s-состояний атомов Te, которые находятся в верхней части валентной зоны в TeO₂ и в нижней части зоны проводимости в TeO₃.

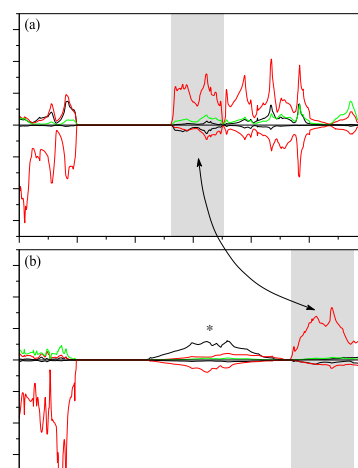


Рис. 1. Плотность электронных состояний в кристаллах α -TeO₂ (a) и β -TeO₃ (b) разложенная на вклады s,p,d орбиталей атомов Te (черные, красные и зеленые кривые в верхней поуплоскости) и s,p-орбиталей атомов O (черные и красные кривые в нижней поуплоскости). Штриховкой выделены области эквивалентных состояний

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Plat, J. Cornette, M. Colas, A.P. Mirgorodsky, M.B. Smirnov, O. Noguera, O. Masson, P. Thomas J. Alloys and Compounds **587** 120 (2014).

Влияние поверхностной энергии на прямой флексоэлектрический эффект в пластине

Юрков А.С.

*ИТ СО РАН Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д.1.
(E-mail: fitec@mail.ru)*

Влияние поверхности на макроскопические свойства ферроиков изучается в течение долгого времени. Типичным примером такого влияния может служить размерный эффект, заключающийся в зависимости эффективной диэлектрической восприимчивости тонкой пленки (пластины) от толщины этой пленки h . Следуя работе [1], этот эффект можно описать в рамках теории Ландау, введя дополнительно поверхностную энергию, квадратичную по поляризации.

Обычно влияние поверхности на величины, усредненные по образцу, исчезает в пределе $h \rightarrow \infty$. Из этого правила, однако, бывают и исключения. В частности, в работе [2] показано, что влияние поверхностной энергии на прямой флексоэлектрический эффект не исчезает в указанном пределе. Оказалось, что независимо от толщины пластины (в том числе в пределе $h \rightarrow \infty$) поляризационный отклик на изгиб пластины отличается в два раза в двух предельных случаях: бесконечно большого и нулевого параметра поверхностной энергии.

В [2] рассмотрение ограничено только предельными случаями для параметра поверхностной энергии. Кроме того, рассматривался только флексоэлектрический эффект, описываемый, в рамках теории сплошной среды, инвариантом типа Лифшица. Так что результаты этой работы имеют, в основном, иллюстративный характер. В то же время, реальности соответствует случай конечного параметра поверхностной энергии. Флексоэлектрический эффект, в более общем случае, описывается не одним, а двумя инвариантами (в принципе, такое описание можно свести к описанию инвариантом типа Лифшица, но при дополнительном учете поверхностного пьезоэлектричества специального вида; существа дела это, однако, не меняет).

Таким образом, результаты работы [2] требуют обобщения, позволяющего использовать произвольные значения параметров. Такое обобщение является целью данной работы. Обобщение заключается в том, что, во-первых, флексоэлектрический эффект описывается двумя независимыми членами: первый содержит произведение градиента поляризации на тензор деформаций, а второй – произведение поляризации на градиент тензора деформаций. Во-вторых, параметр поверхностной энергии имеет произвольное значение. В итоге задача сводится к граничной задаче для дифференциального уравнения второго порядка, достаточно полное решение которой получено в данной работе.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ № 16-19-00119.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Kretschmer and K. Binder, Phys. Rev. B **20**, 1065 (1979).
2. A.S. Yurkov and A.K. Tagantsev, Appl. Phys. Lett. **108**, 022904 (2016).

Частоты валентных и деформационных ОН-колебаний в KDP согласно их зависимости от температуры

Абалмасов В.А., Суровцев Н.В.

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия
(E-mail: abalmassov@iae.nsk.su)*

Сегнетоэлектрический фазовый переход в кристалле KDP (KH_2PO_4), связанный с упорядочением протонов в двухминимумном потенциале водородной связи при температуре ниже 123 К, как и сам кристалл KDP на сегодняшний день являются одними из наиболее изученных [1]. Частоты ОН(OD)-колебаний в кристалле легко выделяются в спектре рассеяния по смещению в область низких частот при дейтерировании и составляют около 1000, 1300, 1800, 2400 и 2700 cm^{-1} (Рис. 1). Однако до сих пор нет полного согласия по поводу соответствующих этим частотам мод колебаний [2, 3].

Согласно измеренному нами спектру комбинационного рассеяния света (КРС) при увеличении температуры в парафазе максимумы 1300 и 1800 cm^{-1} смещаются в область низких частот, а 2400 и 2700 cm^{-1} – в область высоких (Рис. 2) (максимум 1000 cm^{-1} едва различим на фоне большого пика 900 cm^{-1}). Это можно объяснить тем, что при увеличении температуры увеличивается расстояние между атомами решётки, что приводит к уменьшению частоты колебаний в гармоническом потенциале для деформационных мод. В то же время увеличивается барьер в двухминимумном потенциале вдоль водородной связи, что напротив приводит к увеличению частоты валентных колебаний.

Таким образом, частоту 1300 cm^{-1} мы относим к деформационным ОН-колебаниям. Частота 1800 cm^{-1} является комбинационной с явным преобладанием деформационной моды. Частоты 2400 и 2700 cm^{-1} соответствуют преимущественно валентным ОН-колебаниям. Данные выводы подкрепляются аналогичными измерениями в дейтерированном образце.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-02-04950.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лайнс М., Гласс А., Сегнетоэлектрики и родственные им материалы, М.: Мир, 1981. – 736 с.
2. Mita Y., Takebe K., Kobayashi M., Endo S. and Tominaga Y., J. Phys.: Condens. Matter 18, 5185 (2006).
3. Liu W.L., Xia H.R., Wang X.Q. et al., J. Alloys Compd. 430, 226 (2007)

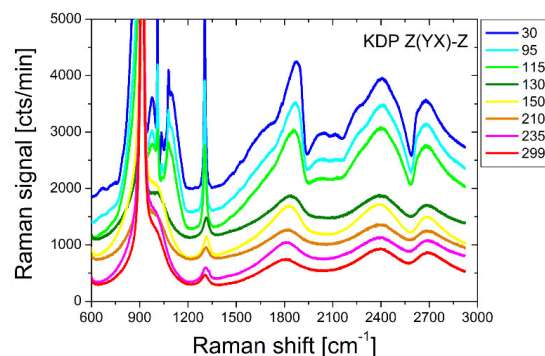


Рис. 1. Спектр КРС кристалла KDP в геометрии Z(YX)-Z при температуре от 30 до 299 К.

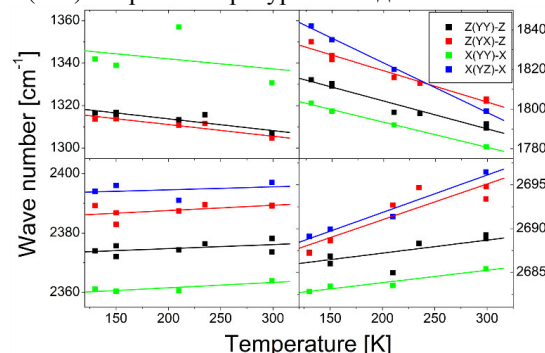


Рис. 2. Зависимость от температуры положения максимума линий ОН-колебаний в KDP в разных геометриях рассеяния.

Расчет динамики кристаллической решетки $YGaO_3$

Андрюшин Н.Д.¹, Павловский М.С.², Зиненко В.И.²

¹Сибирский федеральный университет Красноярск, 660041, Россия
(E-mail: bronyfaq@gmail.com)

²Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН Красноярск, 660036, Россия

В соединениях гексагональных манганитов $R\text{MnO}_3$ (R – редкоземельный ион или Y) наблюдаются два структурных фазовых перехода типа смещения. Первый переход происходит при температурах 1200 – 1300 К, в зависимости от типа редкоземельного иона [1,2]. При этом фазовом переходе пространственная группа симметрии меняется с $R\bar{6}_3/m\bar{m}c$ на $R\bar{6}_3cm$, пропадает центр симметрии, примитивная ячейка утраивается. Второй структурный фазовый переход происходит при температурах 800 – 900 К, при этом объем ячейки и симметрия не меняются. Авторы работ [1,2] называют этот переход изоструктурным.

Соединения $RGaO_3$ (R – редкоземельный ион или Y) синтезируются с пространственной группой симметрии $R\bar{6}_3cm$ и относятся к тому же структурному типу, что и кристаллы $R\text{MnO}_3$ [3]. В настоящей работе проводится теоретическое исследование кристалла $YGaO_3$. Все вычисления проводились в рамках метода функционала плотности реализованного в программном пакете VASP. Равновесные значения параметров решетки и координат ионов кристалла $YGaO_3$ были вычислены для фаз с пространственными группами симметрии $R\bar{6}_3/m\bar{m}c$ и $R\bar{6}_3cm$. Полученные результаты для фазы $R\bar{6}_3cm$ хорошо согласуются с экспериментальными данными [3]. Для фазы $R\bar{6}_3/m\bar{m}c$ были произведены расчеты динамики кристаллической решетки в центре зоны Бриллюэна и в граничной точке $K = 1/3(\mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2)$ (\mathbf{b}_1 , \mathbf{b}_2 , \mathbf{b}_3 – вектора обратной решетки). В граничной точке K была обнаружена нестабильная мода колебания, с которой связан структурный фазовый переход из $R\bar{6}_3/m\bar{m}c$ в $R\bar{6}_3cm$. Зависимость изменения полной энергии исследуемого кристалла от амплитуды смещения ионов по собственному вектору нестабильной моды показана на Рис. 1. Так как собственный вектор нестабильной моды не содержит полярных смещений ионов, для получения электрической поляризации в кристалле $YGaO_3$ нами дополнительно к смещениям атомов по собственному вектору нестабильной моды было произведено смещение ионов по собственному вектору стабильной полярной моды из центра зоны Бриллюэна. Как видно из Рис. 1, такие смещения ионов энергетически более выгодны.

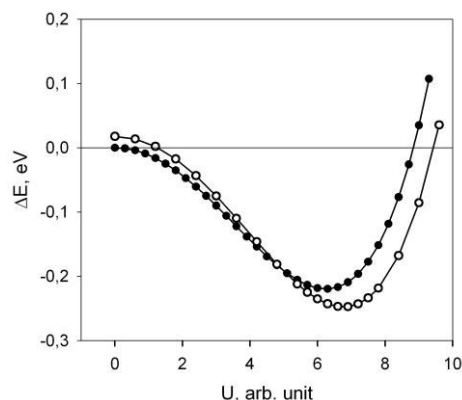


Рис. 1. Зависимость изменения полной энергии от амплитуды смещения ионов по собственным векторам нестабильной моды (черные кружки), нестабильной и полярной мод (белые кружки)

В граничной точке K была обнаружена нестабильная мода колебания, с которой связан структурный фазовый переход из $R\bar{6}_3/m\bar{m}c$ в $R\bar{6}_3cm$. Зависимость изменения полной энергии исследуемого кристалла от амплитуды смещения ионов по собственному вектору нестабильной моды показана на Рис. 1. Так как собственный вектор нестабильной моды не содержит полярных смещений ионов, для получения электрической поляризации в кристалле $YGaO_3$ нами дополнительно к смещениям атомов по собственному вектору нестабильной моды было произведено смещение ионов по собственному вектору стабильной полярной моды из центра зоны Бриллюэна. Как видно из Рис. 1, такие смещения ионов энергетически более выгодны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lonkai Th., Tomuta D.G., Amann U. et al., Phys. Rev. B, **69**, 134108 (2004).
2. Gibbs A.S., Knight K.S., Lightfoot P., Phys. Rev. B, **83**, 094111 (2011).
3. Geller S., Jeffrie J.B., Curlander P.J., Acta Cryst., **B31**, 2770 (1975).

Исследование динамики решетки кристалла LaF_3 методами КР спектроскопии и функционала плотности (DFT)

Ершов А.А.^{1,2}, Крылов А.С.^{1,2}, Орешонков А.С.^{1,2}, Воронов В.Н.¹, Втюрин А.Н.^{1,2}

¹Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КИЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
(E-mail: ershov@iph.krasn.ru)

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

Кристаллы трифторидов с редкоземельными ионами металлов и общей формулой ReF_3 ($\text{Re} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}$) обладают тригональной структурой тисонита и принадлежит к пространственной группе $P\bar{3}c1$, $Z=6$. Структура кристаллов остается постоянной при изменениях температуры от 300 К до точки плавления. В настоящей работе мы использовали метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света для исследования кристалла LaF_3 при понижении температуры с целью изучения возможных проявлений структурных изменений, связанных с фазовыми переходами или процессами анионного разупорядочения.

Регистрация спектров КР монокристаллического образца LaF_3 осуществлялась на спектрометре Horiba Jobin Yvon T-64000 в геометрии обратного рассеяния. Спектры были получены в диапазоне от 8 до 780 cm^{-1} со спектральным разрешением $0,5 \text{ cm}^{-1}$. Источником возбуждения служило излучение Ar^+ - лазера (Spectra-Physics Stabilite 2017) на длине волны 488 нм. Температурные измерения приводились с использованием гелиевого криостата замкнутого цикла ARS CS204-X1.SS в температурном диапазоне 7–400 К с точностью стабилизации температуры менее 1 К.

Из рис. 1, на котором представлена активная область спектров КР кристалла LaF_3 при изменении температурах, следует, что в исследованном температурном диапазоне структурных фазовых переходов не происходит.

Выполнен неэмпирический расчет в рамках теории функционала зарядовой плотности (DFT), использовано приближение обобщенных градиентов (GGA) и приближение локальной плотности (LDA). Получено хорошее согласие теории и эксперимента. В дальнейшем планируется провести расчет параметров Грюнайзена для всех активных в спектрах колебательных линий. Это позволит сделать выводы о характере разупорядочения анионной подрешетки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00351 мол_а.

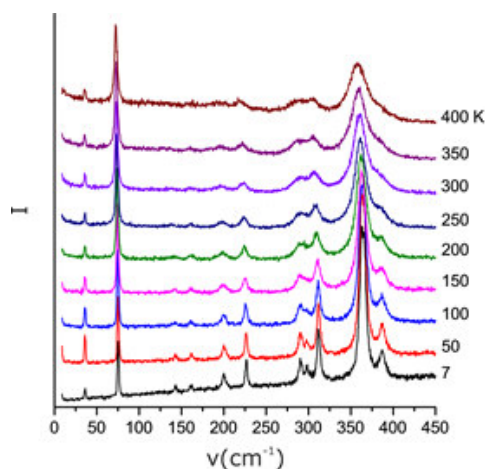


Рис. 1. Температурная трансформация спектров комбинационного рассеяния кристалла LaF_3

Эволюция фазовой диаграммы системы $(1-x)\text{NaNbO}_3-x\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ в зависимости от условий структурообразования

Зубарев Я.Ю., Шилкина Л.А., Дудкина С.А., Резниченко Л.А.

Научно-исследовательский институт физики ЮФУ, Ростов-на-Дону, 344090, Россия
(E-mail: yzubarev@sfnedu.ru)

Представлены результаты рентгенографического исследования процессов фазообразования в зависимости от термодинамической предыстории – условий получения твердых растворов (ТР) бинарной системы $(1-x)\text{NaNbO}_3-x\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ ($0 \leq x \leq 1$, $\Delta x = 0.05$). Крайние компоненты системы – NaNbO_3 – антисегнетоэлектрик со структурой типа перовскит и $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ – высокотемпературный сегнетоэлектрик со слоистой перовскитоподобной структурой. ТР получены методом твердофазных реакций с последующим спеканием (при двух температурах ($T_{\text{СП}}$) равных 1530К и 1670К) по обычной керамической технологии.

Рентгенографически установлено, что в обоих случаях структура перовскита (П) существует в интервале $0.0 \leq x \leq 0.2$, а, с продвижением вглубь системы, для $x > 0.2$ на фазовой диаграмме появляется серия слоистых фаз (С) с общей формулой $(\text{NaCa})_n\text{Nb}_n\text{O}_{3n+2}$. При $T_{\text{СП}}=1530\text{К}$, с ростом x , образуются соединения: С(1) – $n=12$, С(2) – $n=10$, С(3) – $n=6$, С(4) – $n=5$, С(5) – $n=4.5$, С(6) – $n=4$; тогда как при $T_{\text{СП}}=1670\text{К}$ количество фаз увеличивается и изменяется n : С*(1) – $n=11$, С*(2) – $n=9.5$, С*(3) – $n=8.2$, С*(4) – $n=6$, С*(5) – $n=4.5$, С*(6) – $n=5$, С*(7) – $n=4$.

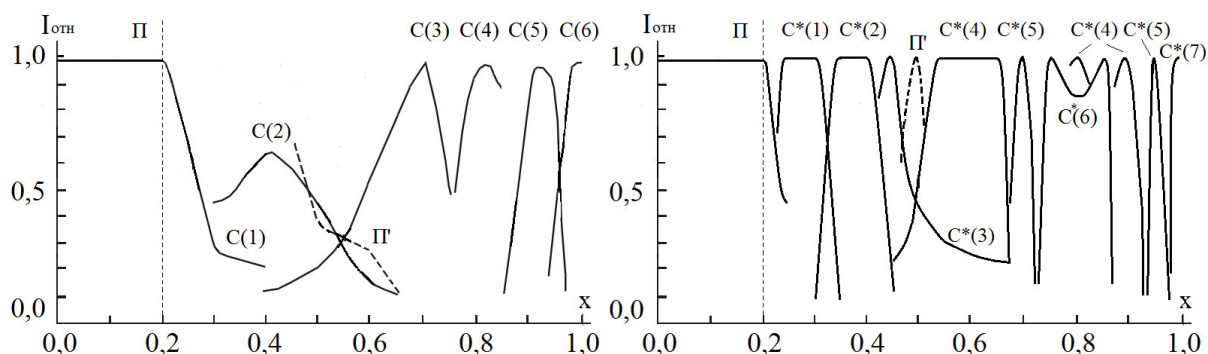


Рис.1. Фазовая диаграмма системы $(1-x)\text{NaNbO}_3-x\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ при $T_{\text{СП}}=1530\text{К}$ (слева) и $T_{\text{СП}}=1670\text{К}$ (справа).

На рис. 1 представлены фазовые диаграммы исследуемой системы при двух $T_{\text{СП}}$. Как видно из рисунка, повышение $T_{\text{СП}}$ приводит к большей изрезанности фазовой диаграммы и уменьшению концентрационных интервалов существования С-фаз. Сосуществующая одновременно с С-фазами вторая перовскитовая фаза П' при $T_{\text{СП}}=1530\text{К}$ расположена в интервале $0.45 \leq x \leq 0.65$, а при $T_{\text{СП}}=1670\text{К}$ - в более узком интервале в окрестности $x=0.5$.

Установленная нами критическая зависимость структурообразования ТР анализируемой системы от условий изготовления объясняет многообразие слоистых фаз, мотив которых состоит из пакетов с различным количеством кислородных октаэдров VO_6 .

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

Анализ распределения ионов в кристаллической решетке ниобата стронция-кальция –бария

Малышкина О.В.¹, Иванова А.И.¹, Малышкин Ю.А.¹, Фоломеева А.¹,
Dec J.²

¹*Тверской государственный университет, Тверь, 170002, Россия
(E-mail: Olga.Malyshkina@mail.ru)*

²*University of Silesia, Institute of Materials Science, PL-40-007 Katowice, Poland*

В работе исследовались кристаллы твердых растворов на основе ниобата бария-кальция $\text{Ca}_{0.28}\text{Ba}_{0.72}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (CBN28) и ниобата бария-стронция $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN61) со следующей номинальной концентрацией SBN61 и CBN28 в растворе:

$(\text{Ca}_{0.28}\text{Ba}_{0.72})_{0.25}(\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39})_{0.75}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (CSBN25);

$(\text{Ca}_{0.28}\text{Ba}_{0.72})_{0.50}(\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39})_{0.50}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (CSBN50);

$(\text{Ca}_{0.28}\text{Ba}_{0.72})_{0.75}(\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39})_{0.25}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (CSBN75).

Кристаллы SBN и CBN имеют структуру типа вольфрамовой бронзы, для которой характерно объединение кислородных октаэдров связанных вершинами между собой сложным образом, таким что, они образуют три типа открытых каналов: пятиугольные, квадратные и треугольные. Если для SBN тетрагональные пустоты (A1) заполняются ионами Sr имеющими меньший радиус, а пятиугольные пустоты (A2) с равной вероятностью заполняются ионами Ba and Sr, то для CBN A1 заполняются только Ca, A2 только Ba. кристаллы CSBN содержат три типа ионов – Ca, Ba and Sr, способных заполнять пустоты A1 and A2.

Целью проводимых исследований было установление взаимосвязи между распределением ионов Ca, Ba, Sr и O по объему образцов CSBN с сегнетоэлектрическими свойствами данных материалов. Определение элементного состава производилось на электронном сканирующем микроскопе (SEM) (JEOL 6510LV) с использованием энерго-дисперсионной приставки (EDA). Спектр для элементного анализа набирался поточечно в разных местах боковой поверхности образцов.

По результатам элементного анализа был проведен расчет среднестатистической концентрации элементов и их стандартное отклонение (на соответствующе статистической выборке).

Анализ показал избыток кислорода во всех исследуемых образца (сравнение проводилось по расчету на основе химической формулы), составляющий 3 атома на элементарную ячейку для кристалла CSBN25 и 4,5 и 4,6 атомов для кристаллов CSBN50 и CSBN75 соответственно. Согласно общей формуле: $(A1)_2(A2)_4C_4Nb_{10}O_{30}$, у кристаллов CBN и SBN, имеются 4 вакансии в позиции C и одна в позиции A1 или A2. Естественно предположить, что избыточные атомы кислорода занимают именно эти позиции. Поскольку атомы Nb могут располагаться только в центрах кислородных октаэдров, представлял интерес анализ отношения элементов (Ca + Ba + Sr) к Nb. Расчет показал, что для всех исследуемых составов это соотношение есть 9 к 20., т.е на две элементарные ячейки отсутствует один атом кальция стронция или бария.

В то же время, несмотря на наличие микроскопических неоднородностей, на макроскопических расстояниях исследуемые кристаллы однородны.

Высокотемпературный отжиг образцов при температуре на 50 градусов выше точки Кюри не привел к существенному изменению отношений элементов в кристаллической решетке, наблюдалось только перераспределение атомов кислорода по толщине образцов CSBN25 и CSBN75.

Исследование структуры промежуточных фаз гафната свинца

**Князева М.А., Бурковский Р.Г., Андроникова Д.А., Бронвальд Ю.А.,
Вахрушев С.Б., Филимонов А.В.**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Санкт-Петербург, Россия (E-mail: kniazeva.maria225@yandex.ru)

Целью данной работы является получение информации о структуре неизученных промежуточных фаз гафната свинца (PbHfO_3) и уточнение его фазовой диаграммы в пространстве температура–давление. Эксперимент произведён с использованием экспериментального оборудования Европейского синхротронного источника (ESRF) — на линии ID27.

В результате эксперимента получены реконструкции обратного пространства для различных фаз PbHfO_3 (рис. 1), а также построена уточнённая фазовая диаграмма PbHfO_3 (рис. 2). Несоразмерные модуляции в свинцовой подрешётке, появляющиеся при переходе в несоразмерно модулированную фазу, могут быть реализованы с различным периодом модуляции $q \approx 4.55$ r.l.u. и ≈ 5.88 r.l.u. Систематическое погасание рефлексов в М-позициях в высокосимметричном направлении $[h + \frac{1}{2}, 0, h + \frac{1}{2}]$ свидетельствует о повороте кислородных октаэдров [3]. Для фазы, наблюдаемой лишь при отличных от атмосферного давлениях, характерно наличие диффузного рассеяния, отличного по топологии в цирконате свинца в параэлектрической фазе наличием максимумов в точках обратного пространства, расположенных в направлении $[1\ 0\ 1]$.

Выражаю благодарность правительству Санкт-Петербурга за предоставление гранта.

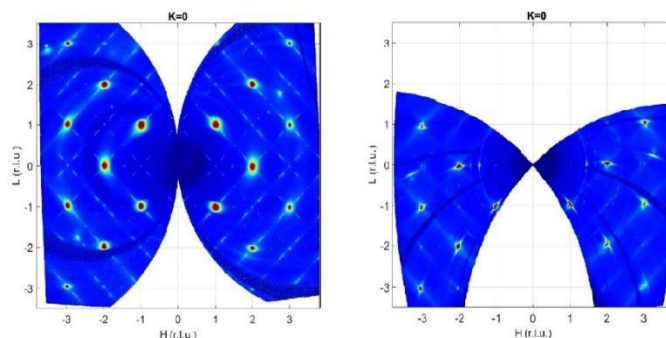


Рис. 1 Реконструкции обратного пространства для промежуточных фаз в PbHfO_3 при температуре 202°C и 244°C

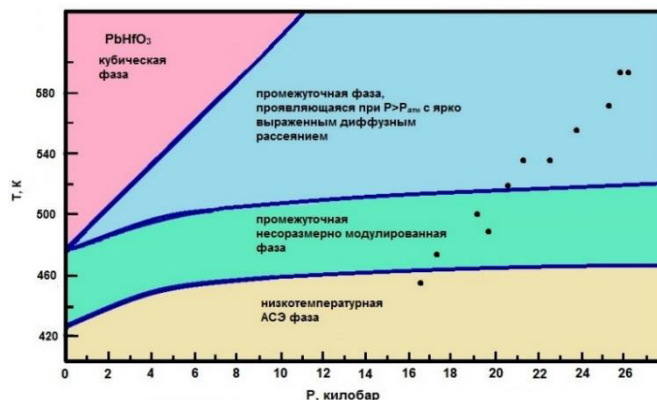


Рис. 2 Уточнённая фазовая диаграмма PbHfO_3 в пространстве температура–давление: область от 0 до 10 kbar была получена ранее [1], точки на диаграмме соответствуют проведённым измерениям

ЛИТЕРАТУРА

1. Samara G. A. *Ferroelectrics*. — Т. 2. — №. 1. — С. 277-289. (1971).
2. Tagantsev A. K. et al. *Nature communications* 4 (2013).
3. Glazer A. M. *Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry* Т. 28. — №. 11. — С. 3384-3392. (1972).

Комбинационное рассеяние света на мягкой моде в кристаллах ниобата лития

Горелик В.С.^{1,2}, Пятышев А.Ю.^{2,3}

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия

²МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005, Россия (E-mail: jb_valensia@mail.ru)

³АО «НПП «Исток» им Шокина, Фрязино, 141190, Россия

К числу диэлектрических материалов, широко применяющихся в акусто- и оптоэлектронике относятся монокристаллы на основе оксидных соединений ниобия, важнейшими из которых являются сегнетоэлектрические монокристаллы ниобата лития (LiNbO_3). При температуре $T_c=1483$ К в этом кристалле происходит фазовый переход из сегнетоэлектрической фазы с группой симметрии $C_{3v}^6 (R3c)$ в параэлектрическую фазу с группой симметрии $D_{3d}^6 (R\bar{3}c)$. В данной работе сообщается о закономерностях в колебательном спектре кристаллов ниобата лития, связанных с размягчением кристаллической решётки при приближении к точке сегнетоэлектрического фазового перехода. Приведены данные о спектрах комбинационного рассеяния (КР) монокристаллов ниобата лития для поляризационной геометрии $X(ZZ)Y$, при которой, согласно правилам отбора, в спектрах КР проявляется мягкая мода, классифицируемая $1A_1(\text{TO})$ -типом симметрии. Частота этой моды при комнатной температуре составляет 250 см^{-1} . Как выяснилось из эксперимента в низкочастотной области спектра при этой же поляризационной геометрии обнаруживаются две дополнительные полосы, относящиеся к псевдоскалярной моде A_2 и двухфононому состоянию (бифонону) соответственно. При приближении к точке сегнетоэлектрического фазового перехода происходит резонансное взаимодействие между фундаментальной модой $1A_1(\text{TO})$ и дополнительными модами в низкочастотной области спектра. Для получения количественной информации о характеристиках мягкой моды в этом кристалле построены изочастотные зависимости [1-3] интенсивности КР при фиксированных частотах ($15, 20, 30$ и 40 см^{-1}). В результате установлено, что при приближении к точке сегнетоэлектрического фазового перехода обнаруживается эффект изочастотной опалесценции, состоящий в резком возрастании интенсивности сигнала КР на фиксированных частотах, вблизи возбуждающей линии. Наблюдаемые экспериментальные закономерности в изочастотных спектрах КР вблизи высокотемпературного фазового перехода в кристаллах ниобата лития сопоставлены с теоретическими зависимостями в рамках приближения одной (эффективной) мягкой моды. В результате оценены критические индексы обсуждаемого сегнетоэлектрического фазового перехода и проанализированы условия проявления узкого центрального пика в результате взаимодействия эффективной мягкой моды с вакуумными возбуждениями псевдоскалярного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик В.С. Известия АН СССР, сер. физ. **49**, 282 (1985).
2. Горелик В.С., Точилин С.Д. ФТТ **29**, 238 (1987).
3. Gorelik V.S., Dudak I.A., Bogatko V.V., Venevtsev Yu.N. Ferroelectrics **80**, 125 (1988).

Процессы переключения поляризации в сегнетоэлектрическом кристалле TGS с родамином и релаксоре SBN-61, допированном кобальтом

Ратина Н.В.¹, Бурханов А.И.¹, Медников С.В.¹, Ивлева Л.И.²

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия,
(E-mail: ratinanv@mail.ru)

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия

Ранее [1], на примере модельного сегнетоэлектрика триглицинсульфата (ТГС) и релаксорного сегнетоэлектрика SBN-61 были представлены существенные различия в динамике доменов.

В настоящей работе сопоставляется характер нелинейности диэлектрического отклика тех же кристаллов, что и в [1], однако при наличии в них примесей. Так, кристалл ТГС $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ легирован при выращивании путем добавления в раствор 2% (массовых) органического красителя Родамин 6Ж. Монокристалл релаксорного сегнетоэлектрика SBN-61+0,01Co допирован трехвалентным кобальтом. Исследование такого рода объектов позволит дать более полную картину поведения переполаризационных процессов, обусловленных динамикой доменов при взаимодействии с дефектной структурой материала.

Учитывая, что в неупорядоченном релаксоре SBN-61+0,01Co могут существенным образом проявляться медленные релаксационные процессы, поляризационные свойства изучались методом Сойера–Тауэра на частоте $\nu = 1$ Гц при комнатной температуре. Эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ'_{eff} определялась как $\epsilon'_{\text{eff}} = P/\epsilon_0 E$ где P – поляризация, E – амплитуда синусоидального поля при измерении петель поляризации, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Рисунок иллюстрирует поведение полевых зависимостей нормированных значений эффективных диэлектрических проницаемостей $\epsilon'_{\text{eff}}/\epsilon'_{\text{eff max}}$ от приведенных значений коэрцитивного поля (E/E_c) исследуемых образцов. Значения амплитуд измерительного поля отнесены к значению коэрцитивных полей E_c образцов для данной температуры и частоты. Для ТГС с родамином $E_c \approx 0,42$ кВ/см, для SBN-61+0,01Co $E_c \approx 2,6$ кВ/см. Температура $T = 28^\circ\text{C}$, при которой проводились измерения примерно равноудалена от температуры фазового перехода (для ТГС с родамином - $T_c \approx 50^\circ\text{C}$, для релаксора SBN-61+0,01Co - $T_m \approx 70^\circ\text{C}$ при частоте 1 кГц).

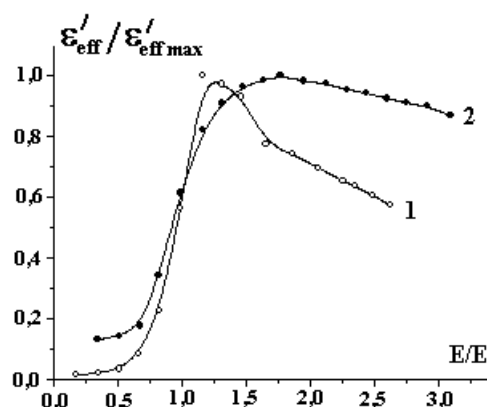


Рис. 1. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от амплитуды измерительного поля кристаллов TGS с родамином 6Ж (1) и SBN-61+Co (2), полученная при комнатной температуре (28°C) на частоте 1 Гц (в относительных единицах)

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Matyjasek, M. Orłowski. Condensed Matter Physics, **16**, No 3, 31704: 1, (2013).

Исследование кристаллической структуры и динамики смешанных кристаллов $K_{2-x}(NH_4)_xSeO_4$ методами рассеяния рентгеновских лучей и нейтронов

Смирнов Л.С.¹, Натканец И.^{2,3}, Лоозе А.⁴, Возник К.⁵, Доминиак П.М.⁵, Цинк Н.⁶, Мелнык Г.⁶, Павлюкойч А.^{2,7}, Местрес Л.⁸, Chudoba D.^{2,3}

¹ФГБУ “Институт теоретической и экспериментальной физики им. Ф.И.Алиханова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, 117218 Москва, Россия (E-mail: lev.smirnov009@yandex.ru)

²I.M.Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, 141980 Dubna, Moscow region, Russia

³Institute of Physics Adam Mickiewicz University, Poznan, Poland

⁴Helmholtz Zentrum Berlin für Materialien und Energie, D-14109 Berlin, Germany

⁵Chemistry Department, Warsaw University, Pasteura 1, 02093 Warszawa, Poland.

⁶Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Mainz, Germany

⁷Institute of Nuclear Chemistry and Technology, Warsaw, Poland 8). University of Barcelona, Barcelona, Spain

Кристаллические структуры смешанных кристаллов $K_{2-x}(NH_4)_xSeO_4$ для концентраций ионов аммония $x=0.15, 0.32, 2.0$ изучены с помощью порошковой рентгеновской и нейтронной дифракции в широком интервале температуры от 300 до 16 К. Динамика смешанных кристаллов $K_{2-x}(NH_4)_xSeO_4$ для концентраций ионов аммония $x=0.15, 0.32, 2.0$ изучена методом неупругого некогерентного рассеяния нейтронов в широком интервале температуры от 300 до 16 К. Измерения порошковой дифракции и неупругого некогерентного рассеяния нейтронов проведены на спектрометре НЕРА-ПРБ установленном на реакторе ИБР-2 Объединенного Института Ядерных Исследований (Дубна, Россия).

Полученные результаты обсуждаются.

Структурные изменения в пентоксиде ванадия при интеркаляции лития

Смирнов М.Б.¹, Рогинский Е.М.²

¹ Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Санкт-Петербург, Россия

(E-mail: smirnob@rambler.ru)

Исследование механизмов структурных изменений в материалах электродов перезаряжаемых литиевых аккумуляторов направлены на повышение эффективности и производительности аккумулятора. Рамановская спектроскопия является одним из методов, позволяющих получать информацию о локальных особенностях структуры вещества. Любые статистически значимые структурные изменения в электродном материале должны проявиться в рамановских спектрах либо в виде смещений и уширений фундаментальных полос, либо в нарушении правил отбора, либо в появлении новых линий, связанных с колебаниями внедренных атомов лития. Однако, отнесение и интерпретация этих спектральных изменений возможно лишь на основе анализа результатов неэмпирических квантово-механических расчетов.

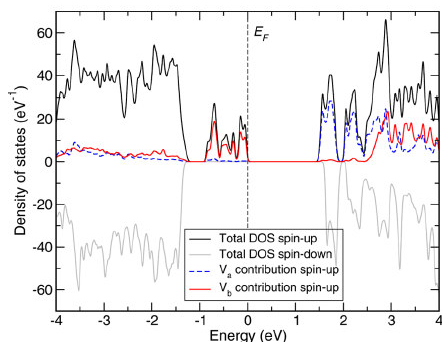


Рис. 2. Плотность энергетического распределения электронных состояний в кристалле γ -LiV₂O₅

функции плотности энергетического распределения электронных состояний (см рис 2). Вследствие интеркаляции атомов лития на кривой этого распределения появляется «щелевая» зона, расположенная между валентной зоной и зоной проводимости. Анализ состояний в этой щелевой зоне показал, что они состоят из d-состояний атомов ванадия, на которые перешли валентные электроны атомов лития.

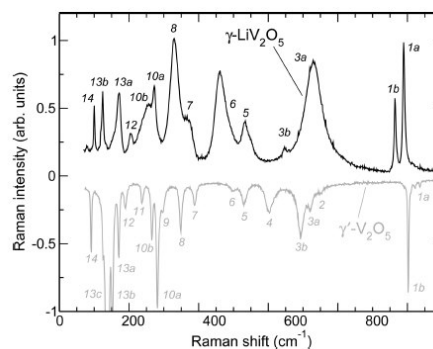


Рис. 1. Сравнение рамановских спектров γ -LiV₂O₅ и γ' -V₂O₅

Путем компьютерного моделирования, основанного на неэмпирических квантово-механических расчетах, было изучено структуры и рамановские спектры кристаллов γ -LiV₂O₅ и γ' -V₂O₅ (см рис 1). Проведено детальное сравнение их структур и колебательных спектров [1,2].

Показано, что структурные изменения, связанные с переходом атомов ванадия Vb из состояний 5+ в состояние 4+. Вывод об изменении валентного состояния атомов Vb сделан на основе анализа

ЛИТЕРАТУРА

1. Baddour-Hadjean R., Smirnov M., Kazimirov V., Smirnov K. and Pereira-Ramos J-P. J. Raman Spectroscopy **46**, 406 (2015).
2. Smirnov M., Roginskii E., Kazimirov V., Smirnov K., Baddour-Hadjean R., Pereira-Ramos J-P. and Zhandun V. J. Phys. Chem. C. **119** 20801 (2015).

Температурная зависимость спектров КР и структура кристалла δ - BiV_3O_6

**Стрикина Е.А., Орешонков А.С., Крылов А.С.,
Втюрин А.Н., Черепяхин А.В.**

*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН Красноярск, 660036, Россия
(E-mail: nas-nas@iph.krasn.ru)*

Фазовая диаграмма системы Bi_2O_3 - V_2O_5 подробно исследовалась еще в 60-х годах прошлого века [1], при этом среди других составов был синтезирован и кристалл трибората висмута BiV_3O_6 . Это соединение привлекло особый интерес многих исследовательских групп в последнее время в связи с обнаружением в нем отличных параметров в области нелинейной оптики, что открывает обширную область их применения в качестве активной среды в системах перестройки частот лазерного излучения. Считалось, что данное соединение находится лишь в α фазе, но за последнее время было открыто еще 6 фаз BiV_3O_6 [2]. На сегодняшний день хорошо исследована только α фаза, которая состоит из групп $[\text{VO}_3]$ и $[\text{VO}_4]$, которые в свою очередь образуют цепочку треугольников и тетраэдров в соотношении 1:2, соответственно. Так же исследования показали, что нелинейность данной фазы связана в основном за счет $[\text{VO}_4]$ тетраэдров, при этом исследования колебательной спектроскопией при различных условиях температур и давлений не проводились. Из известных на сегодняшний день фаз только γ и δ состоят лишь из $[\text{VO}_4]$ тетраэдров, но так как γ имеет центр инверсии, то она не представляет особого интереса для исследования в области нелинейных процессов. В δ фазе кристалл трибората висмута имеет пространственную группу $Pca2_1$, $Z = 4$, то есть нецентросимметричен и более перспективен для применений.

Для получения спектров КР в качестве источника возбуждения было использовано поляризованное излучение 514.5 нм Ar^+ лазера (Spectra-Physics Stabilite 2017) мощностью 100 мВт (15 мВт на образце). Спектры в геометрии 180° были получены на спектрометре Horiba – Jobin Yvon T64000 в частотном диапазоне от 10 до 1600 cm^{-1} . Для температурных исследований использовался криостат замкнутого цикла ASR CS204-X1.SS. Диапазон температур, в котором проводилось исследование: 8–300 К.

Получены поляризованные спектры комбинационного рассеяния, выполнена их теоретико-групповая интерпретация. В программном пакете LADY [3] выполнен полуэмпирический расчет динамики решетки и спектров КР δ и α фаз BiV_3O_6 . Значительная разница в распределении частот и интенсивностей для полярных мод A_1 , полученных при геометриях рассеяния, соответствующих LO и TO фононам, показывает сильное влияние внутренних электрических полей, индуцированных полярными фононами на динамику решетки и процессы рассеяния. В рамках построенной модели динамики решетки определены собственные векторы фононов, для которых эти эффекты выражены наиболее ярко.

ЛИТЕРАТУРА

1. Levin, E. M.; McDaniel, C. L. J. Am. Ceram. Soc., **45**, 355 (1962).
2. Rihong Cong, Jinlong Zhu, Yingxia Wang, Tao Yang, Fuhui Liao, Changqing Jin and Jianhua Lin, CrystEngComm, **11**, 1971(2009).
3. M.B. Smirnov, V.Yu. Kazimirov, LADY: software for lattice dynamics simulations. JINR communications. **E14**, 159, Dubna (2001).

Диэлектрический гистерезис в синусоидально изменяющемся электрическом поле

Акбаева Г.М.¹, Скрылёв А.В.², Бородин В.В.², Панич А.Е.²

¹НИИ Физики Южного федерального университета Ростов-на-Дону, 344090, Россия
(E-mail: gakbaeva@mail.ru)

²Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, 344090, Россия

Исследованы петли диэлектрического гистерезиса сегнетомягкой керамики $\text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3 - \text{PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3 - \text{PbW}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}\text{O}_3 - \text{PbW}_{3,5}\text{Li}_{2/5}\text{O}_3 + \text{Yb}_2\text{O}_3$ [1] с температурой Кюри $T_c = 210^\circ\text{C}$. Исследования проводились на частоте 50 Гц в двух режимах. В первом из них поле включалось на 0,07 сек., во втором - действовало непрерывно. Амплитуда поля E_m изменялась в пределах от 2,5 до 25 кВ/см. и переключалась ступенчато с интервалом 15 мин. Петли диэлектрического гистерезиса регистрировались на осциллографе С8-17 в режиме запоминания, определялось коэрцитивное E_c поле и переключаемая поляризованность P_m . Петли гистерезиса не имеют перетяжек посередине, характерных для большинства сегнетоэлектрических материалов, что отражает факт существования внутреннего поля смещения [2-3]. При $E_m > 15$ кВ/см чётко проявляется переход к насыщению.

Для кривых, полученных в режиме непрерывного поля, зависимости $P_m(E_m)$ имеют ярко выраженный пороговый характер. При достижении значения поля $E_m = E_{m1}$ начинаются временные изменения, сопровождающиеся резким возрастанием P_m , формированием петли гистерезиса и переходом к насыщению. Переключаемая поляризованность в области насыщения оказывается не больше, в отличие от BaTiO_3 и других материалов, а меньше соответствующих значений, полученных при кратковременном включении. При последующем снижении E_m поляризованность P_m быстро убывает (рис. 1). Механизм этого явления изучается.

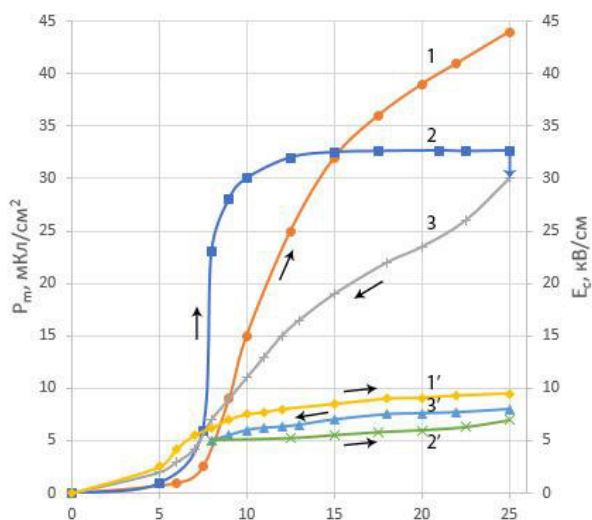


Рис. 1. - Зависимости максимальной поляризованности $P_m(E_m)$ и коэрцитивного поля $E_c(E_m)$ от амплитуды приложенного напряжения: кривые 1 и 1' при импульсном включении поля; кривые 2 и 2' (прямой ход) и кривые 3 и 3' (обратный ход) в непрерывном режиме

ЛИТЕРАТУРА

1. G.M. Akbaeva, A.Ya. Dantsiger, O.N. Razumovskaya "Electroceramics – IV" – Aachen, Germany, 1994. – V. 1. – P. 535–538.
2. Бородин В. З. Сб. тр. III Межвузовской конференции по диэлектрикам и полупроводникам, Ленинград, 1960. – Л: Лениздат, 1960. С. 76-77.
3. Расторопов С. Б., Бородин В. З., Приходьков А. В., Панич А. Е. Известия РАН Сер. физич. – 1993. – Т. 57, № 3. – С. 110-114.

Суперионная проводимость в кристаллах TlInS_2 и TlGaSe_2 индуцированная γ -облучением

Сардарлы Р.М., Алиева Н.А., Салманов Ф.Т., Микаилова А.Д.,
Юсифов М.Ю., Оруджева А.А.

*Институт радиационных проблем национальной академии наук Азербайджана. 370143
– Баку, Азербайджанская Республика, пр. Г. Джавида 31а.
(Y-mail: sardarli@yahoo.com)*

В кристаллах TlInS_2 облученных гамма квантами, исследованы температурные и полевые зависимости электрической проводимости и диэлектрической проницаемости. В исследованных кристаллах обнаружено явление порогового переключения с S-образной вольт-амперной характеристикой, содержащей участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В окрестности критических напряжений наблюдаются осцилляции тока и напряжения. Рассмотрены возможные механизмы электрической неустойчивости в кристалле TlInS_2 .

В спектральной области $25 \div 10^6$ Гц методом импедансной спектроскопии измерены частотные зависимости компонент полного комплексного импеданса и исследованы релаксационные процессы в кристаллах TlInS_2 и TlGaSe_2 , до, и после радиационного воздействия дозой в 25 Мрад. Обнаружено уменьшение времен релаксации в кристалле, после радиационного воздействия. С использованием метода эквивалентных схем замещения проанализированы полученные диаграммы на комплексной плоскости ($Z''-Z'$). Показано, что после γ – облучения в кристаллах TlInS_2 и TlGaSe_2 возникает фазовый переход с переходом системы в суперионное состояние.

Диаграммы, на комплексной плоскости ($Z''-Z'$), полученные из измерений после воздействия γ – квантами, представляют собой полуокружности для одной параллельной RC-цепочки и лучи в низкочастотной области диаграмм. Эти лучи на импедансной диаграмме, по всей вероятности, связаны с диффузным импедансом Варбурга, в основе которой лежит идея того, что в частотном диапазоне приложенного синусоидального сигнала диффузия носителей не достигает границы диффузного слоя. Ответственным за возникновение диффузного импеданса Варбурга может быть переход кристалла в суперионное состояние, вызванное разупорядочением системы вследствие радиационного воздействия.

Ранее в работах нами было показано, что в кристаллах группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}^{\text{VI}}_2$, при температурах выше 300 К проявляются особенности связанные с наличием ионной проводимости. В этом случае, ответственным за наличие диффузного импеданса Варбурга в годографах исследованного кристалла могут быть ионы Tl^{+1} диффундирующие в кристалле, после перехода системы в суперионное состояние, при этом фактором, способствующим мобильности ионов Tl^{+1} являются дефекты, вызванные радиационным воздействием.

Влияние температуры спекания на структуру и свойства керамики ЦТС

Топчиёв А.А.¹, Барабанова Е.В.¹, Вихрова Д.А.¹, Малышкина О.В.¹

¹Тверской государственный университет, Тверь, 170002, Россия
(E-mail: pechenkin_kat@mail.ru)

В работе исследовалось влияние температуры спекания керамики системы ЦТС на формирование ее микроструктуры, доменной структуры и свойств с целью выявления наиболее оптимальных условий формирования сегнетоэлектрических и пьезоэлектрических свойств керамики. В качестве объектов исследования была выбрана пьезоэлектрическая керамика состава ЦТС-46, не прошедшая этап спекания и синтеза («сырая керамика»). Согласно промышленной технологии керамика ЦТС-46 спекается с выдержкой 4 часа при максимальной температуре 970°C. В работе были выбраны различные конечные температуры спекания ниже и равно 970°C. Скорость нагрева и время выдержки оставались неизменными.

Исследование микроструктуры производилось на растровом электронном микроскопе и атомно-силовом микроскопе (АСМ). Изучение доменной структуры выполнялось на АСМ методом силовой микроскопии пьезоотклика. Как следует из полученных данных, активное увеличение размеров зерен начинается от температуры 860°C. Формирование сегнетоэлектрических доменов также начинается от температуры спекания 860°C. Изначально они имеют неправильную форму с нечеткими границами раздела. При повышении температуры спекания внутри этих областей появляются полосовые домены. Размер их в среднем составляет порядка 100-200 нм. И доменная структура, и микроструктура активно видоизменяются до 910-930°C, выше этих температур изменения минимальны.

Было исследовано поведение диэлектрических характеристик спеченных образцов в диапазоне частот 1-10⁶ Гц. Как видно из рисунка 1, при температурах спекания 910-970°C поведение $tg\delta(f)$ практически не зависит от температуры спекания. Для всех образцов наблюдается увеличение диэлектрических потерь с ростом частоты. Диэлектрическая проницаемость также не зависит от температуры, при которой происходило спекание керамики.

Таким образом, можно предположить, что формирование диэлектрических и сегнетоэлектрических свойств (исходя из данных по доменной структуре) происходит в интервале температур спекания 860-910°C и дальнейшее повышение температуры спекания на них слабо влияет. Для проверки данного утверждения были исследованы петли диэлектрического гистерезиса, а также пьезоэлектрические свойства образцов.

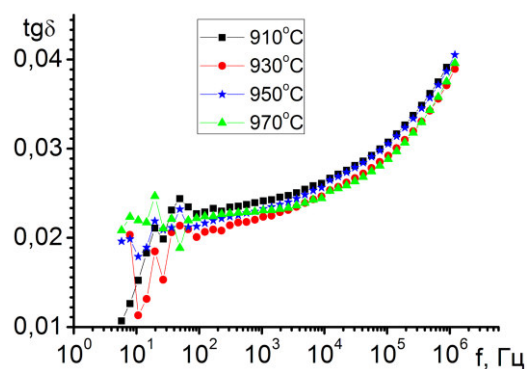


Рис. 1. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в логарифмическом масштабе при комнатной температуре для образцов, изготовленных при разной температуре спекания керамики

Диэлектрические исследования сегнетоэлектрического композита $\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2/\text{BaTiO}_3$

Барышников С.В.¹, Милинский А.Ю.¹, Стукова Е.В.²

¹Благовещенский государственный педагогический университет, 675000, Благовещенск, Россия (E-mail: svbar2003@list.ru)

²Амурский государственный университет, 675026, Благовещенск, Россия

Согласно существующим представлениям причиной сегнетоэлектрического состояния в кристаллах является дальнедействующее диполь-дипольное взаимодействие. Однако электрические взаимодействия могут сказываться на взаимодействиях и между макроскопическими полярными частицами. Так, в работе [1] было показано, что для сегнетоэлектрических порошков KNO_3 наблюдаются коллективные эффекты, когда все изолированные частицы порошка одновременно испытывают фазовый переход. Исследованию диэлектрических свойств и взаимному влиянию компонент в сегнетоэлектрических композитах посвящен ряд публикаций (см., например, [2] и ссылки в этой работе). В данной работе исследуется влияние добавки титаната бария на диэлектрические свойства и температуру Кюри композита $[\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2]_{0.9}/[\text{BaTiO}_3]_{0.1}$.

$\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2$ представляет собой сегнетоэлектрик, который претерпевает фазовый переход первого рода, близкий ко второму с температурой Кюри 40°C при нагреве и 38°C при охлаждении. Предполагается, что спонтанная поляризация возникает за счет упорядочения полярных групп NO_2 . Особенностью $\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2$ является низкочастотная дисперсия, и если на частотах меньше 200 Hz ϵ по направлению $[010]$ превышает 3000, то на частоте 10^5 Hz аномалия вблизи фазового перехода уже не наблюдается.

Для проведения исследований использовались прессованные образцы $\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2$ и образцы $\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2$ с добавкой BaTiO_3 (10 объемных %). Образцы получались тщательным перемешиванием порошков и прессовались при давлении 6000 кг/см^2 . Размер микрокристаллов в композите составлял 3 – 20 мкм, образцы имели форму таблеток диаметром 12 мм и толщиной 1 мм. На рисунке 1 приведены температурные зависимости диэлектрической проницаемости для $\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2$ и композита $[\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2]_{0.9}/[\text{BaTiO}_3]_{0.1}$ на частоте 1 kHz. Как следует из графика, присутствие частиц BaTiO_3 повышает температуру фазового перехода на $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$, в то время как такая же добавка NaNO_2 не приводит к изменению температуры Кюри. Результаты обсуждаются в рамках теории диполь-дипольного взаимодействия.

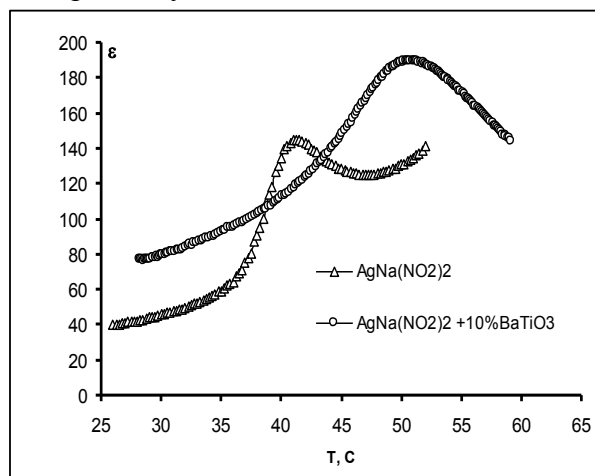


Рис.1 Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для $\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2$ – \triangle и композита $[\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2]_{0.9}/[\text{BaTiO}_3]_{0.1}$. – \circ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Westpha M. J. // Journal of Applied Physics. 1993. V.74, – P.3131.
2. Stukova E.V., Baryshnikov S.V., Koroleva E. Yu. // Ferroelectrics. 2016, V.501, P.1–8.

Особенности фазообразования перовскитовых материалов с элементами Рb и Са в А-подрешетке

Гринь П.Г., Шилкина Л.А., Дудкина С.И., Разумовская О.Н.

Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики,
Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: grin.pavel@inbox.ru)

В настоящее время по-прежнему большое практическое значение для разработки новых функциональных материалов имеет система $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ и твердые растворы (ТР) на ее основе, модифицированные щелочноземельными элементами (Са, Sr, Ва и др.). Однако, технологические трудности их получения затрудняют использование этих объектов в практике. В представленной работе мы попытались выяснить возможные причины наблюдаемого.

Фазовая диаграмма системы $Pb_{1-x}Ca_xTiO_3$ при комнатной температуре имеет следующий вид: в интервале $0 \leq x \leq 0.4$ расположена тетрагональная (Т) фаза, в интервале $0.4 < x < 0.5$ происходит переход из Т фазы в кубическую (К) фазу. Однородный ТР с симметрией $PbTiO_3$, образуется только в узком интервале $x = 0.00-0.05$, а при $x > 0.05$ Т область представляет собой смесь, по меньшей мере, двух неоднородных Т фаз. На зависимости $V_{\text{эксп}}(x)$ (рис. 1) можно выделить три участка: $V_{\text{эксп}}(x)$ в интервале $0.0 < x \leq 0.2$ в некоторой степени соответствует $V_{\text{теор}}(x)$, в интервале $0.2 < x \leq 0.3$ имеет место инвариантный эффект, после которого происходит более резкое снижение $V_{\text{эксп}}(x)$. Из характера поведения $V_{\text{эксп}}(x)$ следует вывод о несоответствии реального ТР заданной химической формуле.

В [1] показано, что в системе $Pb_{1-x}Sr_xTiO_3$ образуются ТР не заданного состава, а соответствующего химической формуле $SrPb_xTi_{1-x}O_3$. Характер изменения $V_{\text{эксп}}(x)$ при $x = 0.30-0.50$ в исследуемой системе позволяет сделать вывод об образовании метапльмбата-титаната кальция в данном интервале.

Таким образом, возникающие технологические трудности вполне могут быть связаны с неоднозначным размещением ионов кальция в кристаллической решетке титаната свинца, которое может критично зависеть от температурных режимов синтеза и спекания материала. Для выяснения этого вопроса исследования будут продолжены.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гринь П.Г., Шилкина Л.А., Дудкина С.И., Резниченко Л.А. Сб-к материалов IX Всероссийской конференции «Керамика и композиционные материалы», 272 (2016).

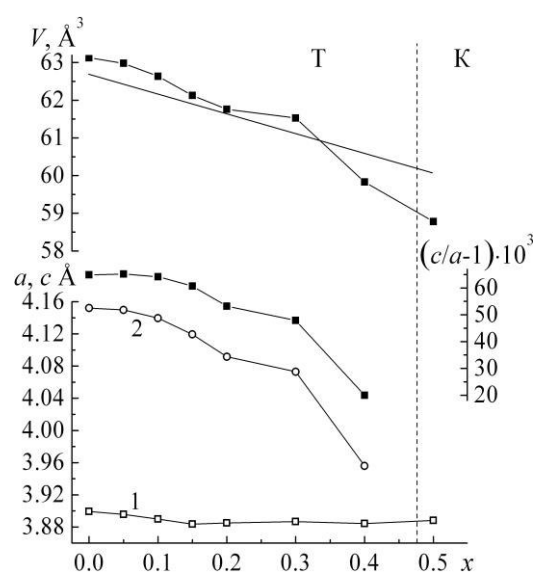


Рис. 1. Зависимости параметров a (1), c (2), c/a , экспериментального и теоретического (прямая линия) объемов, V , ячейки ТР $Pb_{1-x}Ca_xTiO_3$ от x .

Сегнетоэлектрические и суперионные свойства Pb-содержащих молибдатов Ln_2MoO_6 ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}$)

Воронкова В.И.¹, Харитонова Е.П.¹, Орлова Е.И.¹, Казаков С.М.¹

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия (E-mail: voronk@polly.phys.msu.ru)*

В бинарных системах $\text{Ln}_2\text{O}_3 - \text{MoO}_3$ были обнаружены несобственные сегнетоэлектрики $\text{Ln}_2(\text{MoO}_4)_3$, соединения $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ и $\text{Nd}_5\text{Mo}_3\text{O}_{16}$, имеющие высокую кислородную или смешанную кислород-электронную проводимость порядка 10^{-2} См/см при 800 °С. Оксимолибдаты Ln_2MoO_6 с крупными редкоземельными элементами La, Pr, Nd синтезируются при температуре выше 1000°С в тетрагональной фазе, состоящей из одного или двух флюоритовых слоев La_2O_2 и Mo слоя из изолированных тетраэдров [1,2] с пространственными группами с симметрией $I-42m$ и $I4_1/acd$. Существование двух различных пространственных групп вызывало некоторые разногласия.

В настоящей работе впервые изучалось влияние примеси свинца на электрофизические свойства оксимолибдатов в системах $\text{Nd}_2\text{MoO}_6 - \text{PbO}$ и $\text{La}_2\text{MoO}_6 - \text{PbO}$.

Поликристаллические образцы с различным содержанием свинца были получены твердофазным синтезом на воздухе. Образцы были охарактеризованы с помощью дифрактометра ДРОН-2.0 и высокотемпературного рентгена, калориметра NETZSCH STA 449С, импеданс-анализатора Novocontrol Beta N и моста TESLA BM 431 E на частоте 1МГц.

В системе с оксимолибдатом Nd содержание оксида свинца возрастало от 0 до 60 мол.%, в системе с La от 0 до 33.3% с сохранением структуры образцов в тетрагональной фазе. В некоторых образцах были обнаружены тепловые аномалии, свидетельствующие о фазовом переходе. Бесприменные La_2MoO_6 и Nd_2MoO_6 имели проводимость порядка 10^{-4} См/см при 800°С, которая монотонно возрастала с температурой. Подобным образом возрастала и величина диэлектрической проницаемости. При допировании свинцом характер проводимости и диэлектрической проницаемости с температурой резко изменялся. В области фазовых переходов наблюдался резкий скачок проводимости на 2.5 порядка величины с появлением диэлектрической аномалии типа λ -пика. С помощью высокотемпературного рентгена было показано существование в Pb-содержащих образцах Nd_2MoO_6 двух фаз: с высокотемпературной симметричной $I4_1/acd$ и низкотемпературной асимметричной полярно-нейтральной группой $I-42m$. Симметричная фаза при комнатной температуре существует как метастабильная, что и могло вызывать разногласия при определении пространственной группы оксимолибдатов с La, Nd [1, 2]. В образцах со свинцом наблюдался пьезоэффект. Такое поведение диэлектрической проницаемости и проводимости могло свидетельствовать о возникновении антисегнетоэлектрических и суперионных свойств в оксимолибдатах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sillen L.G., Lundborg K. Z. Anorg. Chem. **252**, 2 (1943).
2. Ефремов В.А., Тулин А.В., Трунов В.К.. Коорд. химия. **13**, 1276 (1987).

Диэлектрические характеристики твердых растворов $\text{Tl}(\text{GaS}_2)_{1-x}(\text{InSe}_2)_x$

**Гуртовой В.Г.¹, Шелег А.У.¹, Мустафаева С.Н.², Керимова Э.М.²,
Джафарова С.Г.³**

¹ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» Минск, ул. П. Бровки, 19, 22072,
Беларусь (E-mail: hurtavy@physics.by)

²Институт физики НАН Азербайджана, Баку, пр. Г. Джавида, 33, AZ1143,
Азербайджан

³Гянджинский Государственный Университет, Гянджа, Гейдар Алиев, 187, AZ2000,
Азербайджан

Кристаллы TlGaS_2 и TlInSe_2 относятся к большому семейству трехкомпонентных полупроводниковых соединений типа $\text{TlB}^{\text{III}}\text{C}^{\text{VI}}_2$ ($\text{B} = \text{In}, \text{Ga}$; $\text{C} = \text{S}, \text{Se}$), которые представляют значительный как научный, так и практический интерес. Поскольку соединения группы $\text{TlB}^{\text{III}}\text{C}^{\text{VI}}_2$ оптически активны, обладают высокой фоточувствительностью в широком спектральном диапазоне и перспективны для применения в оптоэлектронике, значительный интерес представляют твердые растворы этих соединений. Поэтому целью данной работы было установление закономерностей изменения электрических и диэлектрических характеристик твердых растворов $\text{Tl}(\text{GaS}_2)_{1-x}(\text{InSe}_2)_x$ в зависимости от состава и температуры.

Проведенные нами ранее рентгенографические исследования [1] показали, что в системе $\text{Tl}(\text{GaS}_2)_{1-x}(\text{InSe}_2)_x$ существуют два ряда твердых растворов: на основе соединения TlGaS_2 с моноклинной структурой в области $\text{TlGaS}_2 - \text{Tl}(\text{GaS}_2)_{0.3}(\text{InSe}_2)_{0.7}$ и на основе TlInSe_2 с тетрагональной структурой в области $\text{TlInSe}_2 - \text{Tl}(\text{GaS}_2)_{0.1}(\text{InSe}_2)_{0.9}$. Представляло интерес провести исследования электрических и диэлектрических характеристик этой системы.

Измерения диэлектрической проницаемости и электропроводности монокристаллических образцов $\text{Tl}(\text{GaS}_2)_{1-x}(\text{InSe}_2)_x$ проводили методом плоского конденсатора на монокристаллических пластинках с размерами $\sim 2 \times 5 \times 1$ mm с помощью цифрового измерителя E7-20 на частотах измерительного поля $10^3 - 10^6$ Hz в температурном диапазоне 150 – 320 K. Измерения проводились перпендикулярно естественным плоскостям скола: (001) у образцов с $x = 0; 0.2; 0.4; 0.7$ и (110) у образцов с $x = 0.9; 1$.

Установлены закономерности изменения электропроводности и диэлектрической проницаемости системы $\text{Tl}(\text{GaS}_2)_{1-x}(\text{InSe}_2)_x$ от состава и температуры. Показано, что с ростом температуры диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость увеличиваются, а с ростом концентрации x – изменяются по линейному закону, при этом проводимость уменьшается, а диэлектрическая проницаемость растет.

Показано, что в системе $\text{Tl}(\text{GaS}_2)_{1-x}(\text{InSe}_2)_x$ с ростом концентрации InSe_2 фазовые переходы соразмерная – несоразмерная фаза смещаются в область более низких температур.

Подтверждено наличие в системе $\text{Tl}(\text{GaS}_2)_{1-x}(\text{InSe}_2)_x$ двух рядов твердых растворов: на основе соединения TlGaS_2 с моноклинной структурой в области $\text{TlGaS}_2 - \text{Tl}(\text{GaS}_2)_{0.3}(\text{InSe}_2)_{0.7}$ и на основе соединения TlInSe_2 с тетрагональной структурой в области $\text{Tl}(\text{GaS}_2)_{0.1}(\text{InSe}_2)_{0.9} - \text{TlInSe}_2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелег А.У., Гуртовой В.Г., Чумак В.А., Мустафаева С.Н., Керимова Э.М.. Кристаллография, **61** (4), 564 (2016).

Негидростатические механические напряжения в прессованном порошке титаната бария и их влияние на сегнетоэлектрический фазовый переход

Зайцева И.В.^{1,2}, Пугачев А.М.², Суровцев Н.В.², Крылов А.С.³

¹Новосибирский государственный университет (НГУ), Новосибирск, 630090, Россия
(E-mail: Iraghbywtccf@gmail.com)

²Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

³Институт физики им. Л.В.Киренского СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

Несмотря на многолетние исследования сегнетоэлектрической керамики [1], исследование ее свойств в зависимости от условий синтеза актуальны и в настоящее время. Неотъемлемой частью синтеза керамики является прессование сегнетоэлектрического порошка под действием негидростатического давления, влияние которого на свойства исходного порошка существенно и значительно отличается от гидростатического давления.

Как показано в [2,3], на примере сегнетоэлектрического порошка титаната бария (BaTiO_3), после негидростатического прессования в образце действуют локальные механические напряжения (ОМН), которые не только приводят к уширению и сдвигу температуры перехода из тетрагональной в кубическую фазу (ФП), но и способствуют появлению релаксорных свойств.

Целью настоящей работы является исследование влияния негидростатических механических напряжений на свойства порошка BaTiO_3 : определение величин ОМН и установление зависимости ширины и температуры ФП от ОМН. В данной работе для оценки величин ОМН применен метод комбинационного рассеяния света (КРС). Для этого использована зависимость позиции линии вблизи 307 cm^{-1} в спектрах КРС от приложенных механических напряжений. Для получения высоких давлений использована мембранная ячейка с алмазными наковальнями. Показано, что определение негидростатических механических напряжений на люминесцентном стандарте $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ приводит к неоднозначным результатам. В связи с этим для регистрации приложенных давлений использован сдвиг линии КРС алмаза на частоте 1332 cm^{-1} в ячейке с алмазными наковальнями. Позиции линии КРС алмаза в зависимости от давления сопоставлены с позициями линии вблизи 307 cm^{-1} , с помощью которых определены величины ОМН. С помощью метода генерации второй оптической гармоники (ГВГ), сигнал которого является чувствительным к наличию нецентросимметричных областей, определена температура и ширина ФП.

В результате качественно и количественно оценены величины приложенных и остаточных механических напряжений в порошках BaTiO_3 . Установлена зависимость температуры и ширины ФП от ОМН, демонстрирующая увеличение температуры ФП на 100К при наличии в образце ОМН около 0,3 GPa.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-02-04950.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Окадзаки, *Технология керамических диэлектриков* (Москва; Энергия: 1976).
2. А. М. Pugachev, V. I. Kovalevsky, V. K. Malinovsky et al., *APL* **107**, 10902 (2015).
3. А.М. Pugachev, V.K. Malinovsky, N.V. Surovtsev et al., *Ferroelectrics* **496**, 225(2016).

Магнитоэлектрические слоистые композиты на основе $Tb_{0,12}Dy_{0,2}Fe_{0,68}$, $Mn_{0,4}Zn_{0,6}Fe_2O_4$ и $PbZr_{0,53}Ti_{0,47}O_3$ с внутренним смещающим магнитным полем

Калгин А.В., Гриднев С.А., Порядский А.А., Суворков Д.Р.

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, 394026,
Российская Федерация (E-mail: kalgin_alexandr@mail.ru)

В последние годы возрос интерес к магнитоэлектрическим (МЭ) композиционным материалам, в которых можно получать большие по величине МЭ отклики в отсутствие внешнего постоянного магнитного поля (поля смещения). Такие композиты обладают внутренним магнитным полем, создаваемым разными способами, поэтому они могут эффективно осуществлять МЭ взаимодействие. Кроме того, на основе таких композитов упрощаются конструкции МЭ устройств благодаря возможности исключения громоздких элементов, создающих внешнее поле смещения.

Для создания внутреннего магнитного поля используются следующие способы: применение магнитных слоев с градиентом намагниченности; получение структур с двумя и более магнитоотрицательными слоями с сильно различающимися магнитными характеристиками; использование магнитных материалов с большой остаточной намагниченностью или магнитоотрицательных материалов с обменной анизотропией и др.

Проведен анализ различных вариантов создания внутреннего магнитного поля смещения в многослойных структурах, представляющих собой чередующиеся слои ферромагнетика $Tb_{0,12}Dy_{0,2}Fe_{0,68}$ (TDF), ферримагнетика $Mn_{0,4}Zn_{0,6}Fe_2O_4$ (MZF) и пьезоэлектрика $PbZr_{0,53}Ti_{0,47}O_3$ (PZT), склеенные друг с другом эпоксидным компаундом (рис. 1).

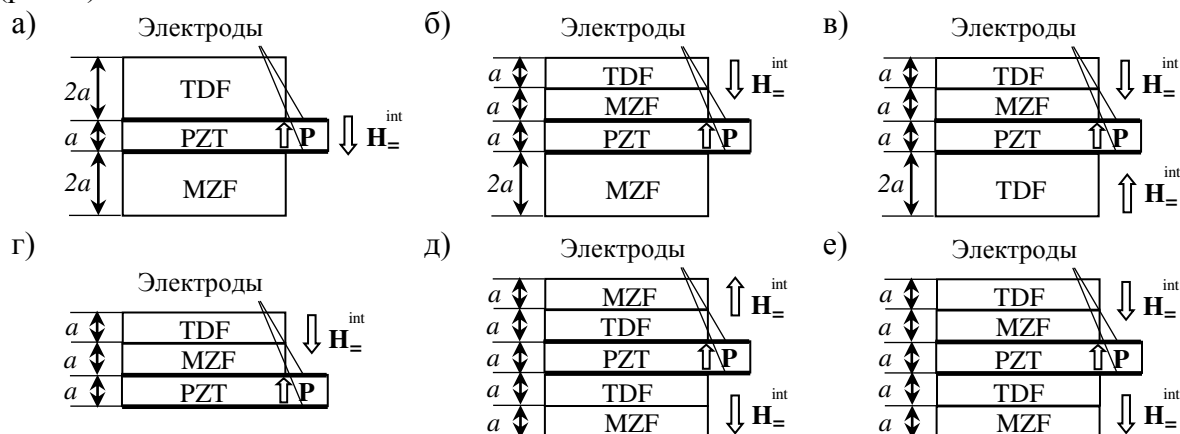


Рис. 1. Схематическое изображение структур многослойных МЭ композитов

Изучены особенности прямого МЭ эффекта в двухслойных композитах, состоящих из слоя пьезоэлектрика PZT, на который нанесен слой эпоксидного компаунда с распределенными в нем гранулами TDF. Использование в магнитном слое градиентного распределения гранул TDF, индуцирующего внутреннее смещающее магнитное поле $H_{\text{int}}^{\text{int}}$, приводит к увеличению МЭ отклика в изученных композитах относительно композитов со случайным распределением гранул TDF, не создающим поле $H_{\text{int}}^{\text{int}}$. Установлена возможность регулирования и определения величины внутреннего поля $H_{\text{int}}^{\text{int}}$ в композитах. Выявлены условия для получения оптимальных величин МЭ откликов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-02-00072 и грант № 16-42-360412) и РНФ (проект № 14-12-00583).

Флуктуации тока в поликристаллической сегнетокерамике

Картунова Е.М., Габриэлян А.В., Жога Л.В.

*Волгоградский государственный технический университет, институт архитектуры и строительства, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая 1, Россия,
(E-mail: levjog@mail.ru)*

Исследовались флуктуации тока в образцах поликристаллической сегнето-электрической керамики ЦТСНВ при постоянном напряжении.

Образцы изготавливались в заводских условиях по одной технологии, но затем хранились в разных условиях, что привело к различающимся в три раза значениями тангенса диэлектрических потерь, в то время как другие электрофизические параметры практически не отличались.

Флуктуации тока при постоянном напряжении на образце измерялись [1] в течение установления постоянного тока утечки и рассматривались как временной ряд, т.е. зависящий от времени, и допускающий только статистическое описание.

Были обработаны экспериментальные данные для десяти образцов из каждой партии. Была обнаружена разница не только в величинах максимальных значений токов в момент подачи напряжения 1кВ, но и в скорости спада тока при выдержке образца под постоянным напряжением.

В работе показана возможность получения информации из хаотических временных сигналов методом фликкер-шумовой спектроскопии [2].

При изучении временных скейлинговых свойств системы на различных участках процесса были рассчитаны спектры плотности мощности сигналов. Количественные параметры, полученные из анализа спектров мощности $S(f)$ и переходных разностных моментов $\Phi(2)(t)$, построенных на основе временных рядов, имеют смысл времен корреляции и параметров, характеризующих потерю корреляционных связей на этих временах корреляции для нерегулярностей типа «всплесков» и «скачков» токов.

Связь между изменением диэлектрических потерь в поликристаллической сегнетокерамике ЦТСНВ и полученными параметрами для $S(f)$ и $\Phi(2)(t)$ позволила показать, что предложенная методика исследования сегнетокерамики позволяет предложить процесс создающий шум со спектром типа $1/f\alpha$ в поликристаллической сегнетокерамике связанный с изменением потерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абсорбционный ток в нагруженной сегнетокерамике. / В.Н. Нестеров, И.В. Кочергин., Л.В. Жога // ФТТ. 2009. Т.51. В.7. С.1439-1441.
2. Тимашев С.Ф., Встовский Г.В. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе хаотических временных рядов динамических переменных и проблема отношения «сигнал-шум» // Электрохимия. 2003. Т.39. №2. С.149-162.

Структура, пьезо- и диэлектрические свойства твёрдых растворов $\text{NaNbO}_3\text{--KNbO}_3\text{--CuNb}_2\text{O}_6$

Кисель О.Ю., Таланов М.В., Шилкина Л.А., Резниченко Л.А.

*Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики,
г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: tmikle-man@mail.ru)*

Керамики бинарной системы $(\text{Na}_{1-y}, \text{K}_y)\text{NbO}_3$ (KNN) составов вблизи морфотропной фазовой границы (при $y \sim 0.50$) за счет высоких значений пьезоэлектрических коэффициентов [1], являются перспективной основой для создания бессвинцовых экологически чистых пьезоэлектрических материалов, способных заменить твердые растворы (ТР) системы $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-z}, \text{Ti}_z)\text{O}_3$ (ЦТС). Изготовление керамики KNN по наиболее доступной для промышленности обычной керамической (традиционной) технологии осложнено летучестью щелочных металлов при высоких температурах и гигроскопичностью исходных реагентов, что приводит к нарушению стехиометрии ТР и невозможности получить высокоплотные образцы. Одним из путей решения этой проблемы является введение в структуру перовскита ионов Cu^{2+} в виде различных соединений, в частности, CuNb_2O_6 , что приводит к значительному снижению оптимальных температур спекания, сохранению стехиометрии заданного состава и повышению относительных плотностей керамик за счет появления жидких фаз [2-3]. Целью данной работы явилось установление влияния CuNb_2O_6 на процессы структурообразования в системе $0.5\text{NaNbO}_3\text{--}(0.5-2x)\text{KNbO}_3\text{--}x\text{CuNb}_2\text{O}_6$ с $x=0\text{--}0.05$ и диэлектрические свойства ее ТР.

Объектами исследования стали керамики системы $0.5\text{NaNbO}_3\text{--}(0.5-2x)\text{KNbO}_3\text{--}x\text{CuNb}_2\text{O}_6$ с $x=0\text{--}0.05$, полученные твердофазным синтезом с последующим спеканием по традиционной технологии. Измерительные образцы представляли собой диски диаметром 10 мм и толщиной 1 мм.

В работе показано, что введение CuNb_2O_6 ($x=0\text{--}0.05$) в бинарную систему KNN ($y = 0.50$) не приводит к структурным фазовым переходам, но провоцирует образование примесной фазы $\text{K}_2\text{Nb}_4\text{O}_{11}$ (при $x > 0.01$) со структурой тетрагональной калиево-вольфрамовой бронзы [4]. Фаза перовскита сохраняет ромбическую симметрию с моноклинной приведенной ячейкой во всем интервале x . Плотность керамик изменяется волнообразно и в интервале $0.01 < x \leq 0.05$, то есть в присутствии второй фазы, четко видна корреляция с зависимостью экспериментального объема перовскитной ячейки. При увеличении x наблюдается резкое снижение значений относительной диэлектрической проницаемости (ϵ/ϵ_0), что, по всей видимости, может быть связано с образованием кислородных вакансий (в случае вхождения ионов меди в В-подрешетку). Установлено, что увеличение x ($x=0.01$) приводит к возрастанию значений пьезочувствительности (g_{33}) до ~ 30 мВ·м/Н, что на 50% выше, чем в случае ТР бинарной системы KNN.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и РФФИ в рамках научных проектов 16-32-00144 «мол_а» и 16-32-60025 «мол_а_дк» с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яффе Б., Кук У., Яффе Г. *Пьезоэлектрическая керамика*. М.: «Мир» 288 с (1974).
2. Park В. С., Hong I. К., Jang Н. D. et al. *Mater. Let.* **64**, 1577-1579 (2010).
3. Таланов М.В., Шилкина Л.А., Резниченко Л.А. *Неорг. Мат.* **52**, 1134-1140 (2016).
4. Madaro F., Sæterli R., Tolchard J.R. et al. *Cryst. Eng. Comm.* **13**, 1304-1313 (2011).

Роль структурных дефектов в формировании физических свойств сегнетокерамик твердых растворов на основе цирконата-титаната свинца

**Константинов Г.М., Макарьев Д.И., Швецова Н.А., Петрова Е.И.,
Рыбьянец А.Н.**

*Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону,
пр. Стачки, 194 (E-mail: georgy.konstantinov@yandex.ru)*

Хорошо известно, что дефекты кристаллической структуры во многом определяют набор физических свойств различных, в том числе активных материалов (сегнетоэлектрики, ферромагнетики, релаксоры). В сегнетокерамиках вопрос влияния структурных дефектов на их структуру и свойства является практически неизученным. Между тем, представляется практически важным научиться управлять физическими свойствами сегнето (пьезо-) материалов путем направленного варьирования структурных дефектов.

В последние годы интенсивное развитие получило исследование механизмов формирования пористой сегнетокерамики. К настоящему моменту на основе пористой сегнетопьезокерамики удалось получить технически важные устройства, реализация которых на основе плотной пьезокерамики является невозможной. Очевидно, что при анализе реальных свойств пористой керамики немаловажную роль играют дефекты кристаллической структуры, уровень которых может существенно отличаться от плотной сегнетокерамики одинакового химического состава. В первую очередь это может быть обусловлено значительно отличающейся микроструктурой пористой и плотной сегнетокерамики.

В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты исследований влияния уровня структурных дефектов на кристаллическую структуру и свойства сегнетоэлектрических твердых растворов на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) с составами, находящимися в различных районах области морфотропного перехода (ОМП). Уровень структурных дефектов керамических материалов оценивался при помощи величины микродеформаций кристаллической решетки и размеров областей когерентного рассеяния (ОКР). Эти величины экспериментально определялись методом рентгеновской порошковой дифракции. Поскольку синтез и спекание сегнетокерамик на основе ЦТС, получаемых по обычной керамической технологии, происходит при высоких температурах, вполне очевидно, что при этих же температурах происходит формирование кристаллической структуры керамики и ее дефектов. По этой причине уровень структурных дефектов различных по составу сегнетокерамик определялся в параэлектрическом состоянии при температурах около 450-500⁰С.

В результате на примере ряда сегнетоматериалов экспериментально установлено, что с ростом микродеформаций и уменьшением размеров ОКР происходит выравнивание концентраций и изменение параметров элементарных ячеек сегнетоэлектрических фаз, сосуществующих в области морфотропного перехода. В работе проводится кристаллохимический анализ экспериментально полученных результатов.

Нелинейная диэлектрическая проницаемость и детерминированный хаос в сегнетоэлектриках системы $K_{1-x}(NH_4)_xH_2PO_4$

Короткова Т.Н.¹, Коротков Л.Н.²

¹Воронежский институт Министерства внутренних дел РФ»,
Воронеж, 394065 Россия

²Воронежский государственный технический университет, Воронеж,
394026, Россия (E-mail: l_korotkov@mail.ru)

Смешанные кристаллы сегнетоэлектрика (СЭ) – антисегнетоэлектрика (АСЭ) дигидрофосфата калия – аммония ($K_{1-x}(NH_4)_xH_2PO_4$) в зависимости от концентрации АСЭ компоненты «х» с понижением температуры испытывают переходы, либо в сегнетоэлектрическую ($x \leq 0,20$), либо в антисегнетоэлектрическую фазу ($x \geq 0,70$). В составах промежуточного интервала концентраций ($0,20 \leq x \leq 0,70$) структурные фазовые переходы подавляются конкурирующим СЭ – АСЭ взаимодействием и в системе при низких температурах реализуется состояние дипольного стекла.

В кристаллах, относящихся к СЭ части диаграммы, с увеличением содержания аммония происходит размытие сегнетоэлектрического фазового перехода, сопровождающееся изменением линейного и нелинейного диэлектрических откликов.

Цель данной работы заключается в установлении закономерностей изменения диэлектрической нелинейности при переходе от составов с четким СЭ фазовым переходом к составам, демонстрирующим стеклоподобное поведение.

Для эксперимента были использованы монокристаллы с содержанием аммония $0,0 \leq x \leq 0,24$. Образцы вырезали в форме прямоугольных пластин с размерами $\approx 7 \times 6 \times 0,8$ мм. Electroды на поверхностях, перпендикулярных тетрагональной оси c создавали путем термического распыления серебра в вакууме. Образцы помещали в криостат, где температура изменялась от 70 до 300 К.

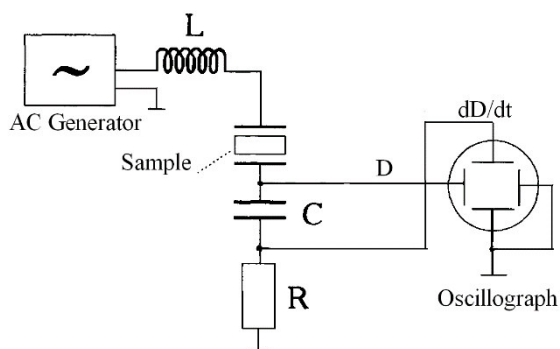


Схема экспериментальной установки показана на рисунке. В ее состав входит генератор синусоидального напряжения, нагруженный на последовательный RLC колебательный контур. Контур содержит катушку индуктивности L, токовый резистор R и образец исследуемого диэлектрика. Конденсатор C выполняет функцию интегратора.

Совокупность полученных результатов показывает, что ниже температуры Кюри нелинейный отклик преимущественно обусловлен доменным механизмом. Это, в частности, подтверждается наблюдением хаотических колебаний в содержащей исследуемый образец в качестве конденсатора C последовательной RLC-цепи, возбуждаемой синусоидальным напряжением.

Вблизи температуры Кюри обнаружены особенности поведения амплитудных зависимостей диэлектрической проницаемости и реверсивной диэлектрической нелинейности, объясняемые возникновением гетерофазного состояния.

Электромеханические свойства монокристаллов $K_{1-x}(NH_4)_xH_2PO_4$ вблизи антисегнетоэлектрического фазового перехода

**Коротков Л.Н.¹ Короткова Т.Н.², Лиховая Д.В.³, Стекленева Л.С.¹,
Левицкий Р.Р.⁴**

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж, 394026, Россия

²Воронежский институт Министерства внутренних дел РФ, Воронеж, 394065 Россия

³Военно – воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, 394064, Россия

⁴Институт физики конденсированных систем НАН Украины, Львов, Украина
(E-mail: l_korotkov@mail.ru)

Смешанные кристаллы сегнетоэлектрика (СЭ) – антисегнетоэлектрика (АСЭ) дигидрофосфата калия – аммония ($K_{1-x}(NH_4)_xH_2PO_4$) в зависимости от концентрации АСЭ компоненты «х» с понижением температуры испытывают переходы, либо в сегнетоэлектрическую ($x \leq 0,20$), либо в антисегнетоэлектрическую фазу ($x \geq 0,70$). Фазовые переходы сопровождаются аномалиями диэлектрических, упругих и электромеханических свойств. Физические свойства СЭ составов системы на качественном уровне сходны со свойствами кристалла дигидрофосфата калия.

Исследования номинально чистых кристаллов дигидрофосфата аммония, претерпевающих переход в АСЭ фазу, оказались затруднены из-за их разрушения при фазовом переходе, вследствие сильных механических напряжений. Вместе с тем, опыт показал, что АСЭ кристаллы, содержащие в своем составе примесные атомы Rb или K, не разрушаются. Это дает возможность изучить поведение упругих и пьезоэлектрических коэффициентов, как в АСЭ фазе, так и в области фазового перехода.

Измерения электромеханических свойств проводили, используя метод «резонанса - антирезонанса». Образцы вырезали в форме прямоугольных пластин соответствующей ориентации из монокристаллов $K_{1-x}(NH_4)_xH_2PO_4$ ($x \approx 0,82, 0,75$) и $Rb_{0,20}(NH_4)_{0,80}H_2PO_4$. Электроды на поверхностях пластин создавали путем термического распыления серебра в вакууме. Образцы помещали в криостат, где температура изменялась от 70 до 300 К.

В ходе эксперимента были получены температурные зависимости диэлектрических проницаемостей ϵ_{11} и ϵ_{33} , упругих податливостей S_4 , и S_6 , пьезоэлектрических модулей d_{14} и d_{36} , а также коэффициентов электромеханической связи k_{14} и k_{36} .

Установлено, в частности, что температурные зависимости диэлектрической проницаемостей ϵ_{11} и ϵ_{33} , пьезомодулей d_{14} и d_{36} и упругих податливостей свободного образца S_4^E и S_6^E в широком интервале температур, лежащем выше температуры Нееля (T_N), подчиняются закону Кюри – Вейсса. Ниже T_N наблюдается значительное ослабление пьезоактивности. В окрестностях T_N температурные зависимости обсуждаемых величин проходят через максимумы, при этом позиции максимумов S_6^E и ϵ_{33} для составов с высоким содержанием ионов калия не совпадают.

Форма аномалий диэлектрического и упругого откликов и их зависимость от состава твердого раствора обсуждаются.

Поляризационный и пьезоэлектрический отклик в органическом сегнетоэлектрике 2-метилбензимидазоле

**Кричевцов Б.Б.¹, Балашова Е.В.¹, Свиначев Ф.Б.¹, Зайцева Н.В.¹,
Панкова Г.А.², Попов С.Н.¹**

¹Физико-технический институт им.А.Ф. Иоффе РАН Санкт-Петербург,
194021, Россия (E-mail: boris@mail.ioffe.ru)

²Институт высокомолекулярных соединений РАН Санкт-Петербург, 199004, Россия

В последнее время был открыт ряд новых органических и полурганических сегнетоэлектриков, обладающих высокими значениями спонтанной поляризации [1,2]. Перспективными представляются кристаллы химически инертного однокомпонентного органического сегнетоэлектрика 2-метилбензимидазола $C_8H_{10}N_2$ (МБИ) [1], имеющего псевдотетрагональную симметрию группы $P4_2/n$ (Pn) [3]. Спонтанная поляризация возникает вдоль цепочек, образованных молекулами 2-метилбензимидазола, связанными водородными связями, в направлениях типа $[110]_{tetra}$, перпендикулярных псевдотетрагональной оси $[001]_{tetra}$, и составляет $P_s \approx 5 \mu C/cm^2$ [1]. Целью работы было выращивание кристаллов МБИ, исследование в них пьезоотклика и переключения поляризации при различных температурах и амплитудах электрического поля.

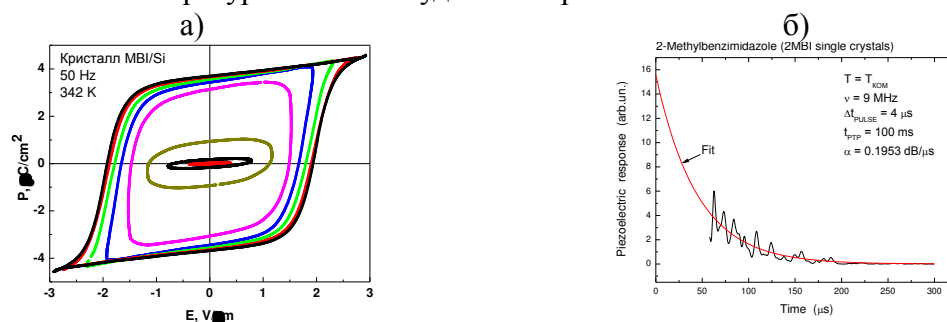


Рис.1 Петли диэлектрического гистерезиса в кристалле МБИ вдоль направления $[110]_{tetra}$ (а) и временные зависимости пьезоотклика (б)

Кристаллы 2-метилбензимидазола были получены методом испарения и методом медленного охлаждения из насыщенного раствора порошка МБИ в этиловом спирте. Петли диэлектрического гистерезиса исследовались в схеме Сойлера–Тауэра в температурном диапазоне (290 – 350) К (Рис.1а). Для обнаружения пьезоэффекта использовался метод пьезоотклика, который ранее применялся для изучения кристаллов аминокислот и аминокислотных соединений [4], и электромеханического резонанса в тонких пластинках. Временная зависимость пьезоотклика в кристаллитах МБИ при комнатной температуре, экспоненциально затухающая со временем, представлена на (Рис.1б).

ЛИТЕРАТУРА

1. Horiuchi S. et al. Nature Communications **3**, Art.2322 (2012).
2. Fu D.-W. et al. SCIENCE **339**, 425 (2013).
3. Obodovskaya A.E., Starikova Z.A., Belous S.N., Pokrovskaya I.E. Journal of Structural Chemistry **32**, 421 (1991).
4. Леманов В.В., Попов С.Н., Панкова Г.А. ФТТ **53**, 1126 (2011).

Микроструктурные особенности и электрофизические характеристики керамоматричных композитов «керамика-кристалл»

**Луговая М.А., Петрова Е.И., Науменко А.А., Константинов Г.М.,
Рыбьянец А.Н.**

*Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки,
194 (E-mail: lugovaya_maria@mail.ru)*

Возможности создания новых сегнетоэлектрических материалов в настоящее время исчерпаны из-за практически полного использования существующих химических основ и способов их получения. В связи с этим актуален переход к многокомпонентным, структурированным на различных масштабных уровнях композиционным материалам, сочетающим принципиально различные физические свойства. Сегнетоактивные керамоматричные композиты «керамика-кристалл» являются одним из новых перспективных семейств композиционных материалов [1].

Основной задачей настоящей работы являлась разработка технологии и исследование керамоматричных композитов «керамика-кристалл». В качестве материала керамической матрицы была выбрана сегнетопъезокерамика системы ЦТС состава $PbTi_{0,45}Zr_{0,53}(W_{1/2}Cd_{1/2})_{0,02}O_3$. Измельченный кристаллический порошок $LiNbO_3$ с различным размером частиц использовался в качестве кристаллического наполнителя. Экспериментальные образцы керамоматричных композитов получались по обычной керамической технологии с использованием специальных режимов помола смешивания и спекания исходных компонентов. Микроструктурные исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа (НИТАСНИ ТМ 1000) и оптического микроскопа (NeoPhot-21).

Получены образцы пьезоактивных керамоматричных композитов ЦТС/ $LiNbO_3$ с объемной концентрацией $LiNbO_3$ от 0 до 30 об.%. Проведены измерения комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров, а также микроструктурные исследования полученных образцов.

Установлено, что в формировании экстремальных электрофизических свойств керамоматричных композитов «керамика-кристалл» наряду с влиянием свойств и структуры пьезокерамической матрицы и кристаллического наполнителя определяющую роль играет возникающая при спекании микропористость пьезокерамической матрицы. Введение в пьезокерамическую матрицу безусадочного кристаллического наполнителя препятствует усадке керамической матрицы при спекании и приводит к появлению микропористости. Зависимости электрофизических параметров керамоматричного композита «керамика-кристалл» от содержания кристаллического наполнителя определяются конкурирующим влиянием увеличения микропористости керамической матрицы и роста содержания кристаллического наполнителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rybyanets A.N., Rybyanets A.A. IEEE Trans. UFFC **58**, 9, 1757 (2011).

Послеростовая термическая обработка и классификация микро- и макродефектной структуры сильно легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$

Макарова О.В., Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Бирюкова И.В.

ИХТРЭМС КНЦ РАН, Анатимы, 184209, Россия (e-mail: makarova@chemy.kolasc.net.ru)

В связи с возможностью сегрегации примеси в объеме кристалла и заметным увеличением температуры Кюри (приближении ее к температуре плавления) [1] процессы послеростового термического (ТО) и электротермического отжига - монодоменизации (высокотемпературного электродиффузионного отжига – ВТЭДО) сильно легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ существенно отличаются от таковых для номинально чистых кристаллов LiNbO_3 конгруэнтного состава и слабо легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$. ВТЭДО проводят не только с целью формирования монодоменного состояния кристалла, но и для максимально возможного избавления от макро-, мезо- и микродефектов кристалла. Исследования макро- и микродефектной структуры проводили с помощью системы анализа изображения «Thixomet», включающей оптический микроскоп Axio Observer.D1m фирмы «Carl Zeiss», состыкованный через цифровую видеокамеру PixeLink PL-B774U с компьютером, оснащенный программой «ThixometPRO». В работе проведена классификация как типичных и хорошо известных макро- и мезодефектов (полосы и кольца роста, «нити», двойники, граненость, винтовые дислокации, ячеистая структура), делающих невозможным использования кристалла в оптических устройствах и устройствах электронной техники, так и мало исследованных в литературе дефектов микроуровня. В работе обсуждаются причины появления дефектов различных типов и предложены методы их устранения. Основными макродефектами, ограничивающими использование кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$, являются кольца и полосы роста, возникающие как результат отклонения от оптимальных термодинамических условий роста: слишком высокие скорости роста, большой градиент температур на фронте кристаллизации и т.п.

Дефектами, характеризующими качество структуры кристалла на микроуровне, являются треугольные и многоугольные микродомены с размерами порядка 1 – 20 мкм. Причиной их появления является, как правило, неправильно проведенная процедура ВТЭДО. Показано, что многоугольные микродомены с характерными размерами 10-20 мкм формируются, как правило, в более совершенной, а треугольные микродомены с характерными размерами 1 – 10 мкм в более дефектной области кристалла. То есть, по количеству и типу микродефектов можно судить об эффективности процедуры ВТЭДО.

Кроме того, результаты электротермической обработки зависят от способа легирования кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$. Так, исследование методами оптической микроскопии макро- и микроструктур после проведения ТО и ВТЭДО показало существенно меньший уровень дефектности гомогенно легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ по сравнению с кристаллами $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$, полученными прямым легированием шихты [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. M.N. Palatnikov, I.V. Biryukova et al., J. Crystal Growth **291**, 390 (2006).
2. M.N. Palatnikov, I.V. Birukova et al., J. Crystal Growth **386**, 113 (2014).

Диэлектрические свойства сегнетоэлектрических нанокompозитов на основе KD_2PO_4

Милинский А.Ю.¹, Барышников С.В.¹, Чарная Е.В.²,
Самойлович М.И.³

¹Благовещенский государственный педагогический университет, Благовещенск,
675000, Россия (E-mail: a.milinskiy@mail.ru)

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504,
Россия

³ЦНИИТИ, «Техномаш», Москва, 121108, Россия

Одной из наиболее существенных проблем, стоящих перед современной физикой, является изучение особенностей физических свойств наноструктур и нанокompозитов, связанных с уменьшением характерных размеров компонент. Значительные усилия направлены в том числе на исследования сегнетоэлектрических систем пониженной размерности. В данной работе мы сообщаем результаты исследований диэлектрических свойств нанокompозитов, состоящих из наночастиц DKDP, внедренных в опаловую матрицу и молекулярные сита SBA-15. Для сравнения проводились исследования объемного DKDP.

Опаловые матрицы имеют поры двух типов между плотно упакованными шарами SiO_2 с диаметром 260-270 нм. Мезопористые силикатные материалы SBA-15 имеют регулярно расположенные цилиндрические поры диаметром 6.9 нм с удельным объемом 0.6 cm^3/g .

На рис. 1 представлены температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса диэлектрических потерь $tg\delta$ для объемного DKDP. Температура фазового перехода T_c , определенная по максимуму ϵ' , составляет ~ 223 К. Тангенс диэлектрических потерь в точке T_c стремится к нулю. При дальнейшем охлаждении $tg\delta$ имеет вторую аномалию около 168 К, связанную с «замораживанием» движения доменных стенок [1].

Для DKDP в опале сегнетоэлектрический переход смещен в сторону высоких температур и наблюдается при 228.0 ± 0.2 К. В точке T_c кривые $\epsilon'(T)$ и $tg\delta(T)$ обладают выраженным максимумом (рис.2). Температура, соответствующая «замораживанию» доменов, определенная по второму максимуму $tg\delta$, повышается до ~ 185 К (вставка к рис.2).

Для DKDP в молекулярных ситах SBA-15 кривые $\epsilon'(T)$ и $tg\delta(T)$ не имеют значительных аномалий в интервале температур 100-300 К, что свидетельствует об отсутствии сегнетоэлектрического перехода в этом интервале. Отсутствие фазового перехода было обнаружено ранее для DKDP в пористых стеклах [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шувалов Л.А., Желудев И.С., Мнацаканян А.В. Известия АН СССР, Сер. Физ. **31**, 1919 (1967).
2. Dorner B., Golosovsky I., Kumzerov Yu., et al. Ferroelectrics **286**, 213 (2003).

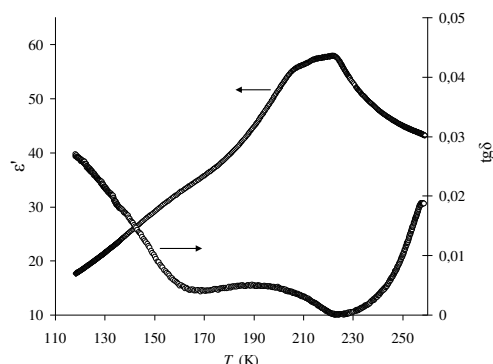


Рис.1

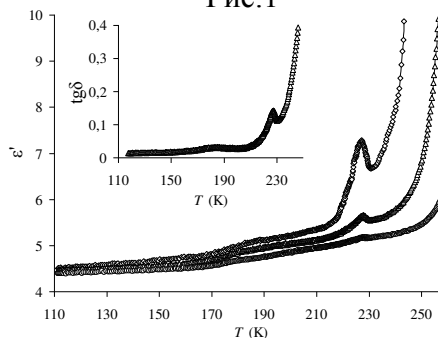


Рис.2

Температурный гистерезис ёмкости конденсаторных структур на основе керамики BSTO различного состава

Семёнов А.А.¹, Дедык А.И.¹, Пахомов О.В.², Павлова Ю.В.¹,
Мыльников И.Л.¹, Буй М.Т.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, 197376, Россия (E-mail: mylnikov.il@gmail.com)

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО
Санкт-Петербург, 197101, Россия

Керамика на основе титаната бария – стронция (BSTO) относится к наиболее широко применяемым в технике сегнетоэлектрикам со структурой перовскита. Для снижения уровня потерь ($\tan\delta$) в структурах на основе BSTO обычно используют примеси Mg и Mn. Лучшие результаты по снижению $\tan\delta$ ($\sim 10^{-3}$) при сохранении нелинейной зависимости диэлектрической проницаемости ϵ от напряженности поля (E) получены для легирования Mg [1]. Легирование ионами Mn, кроме эффекта снижения диэлектрических потерь, позволяют получить материал со свойствами мультиферроиков [2].

Проведены исследования диэлектрических характеристик керамики BSTO различного состава, легированной примесями Mg и Mn при согласованном воздействии электрического поля и температуры.

Изготовление образцов $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ ($x = 0,4 - 1$), а также образцов с добавками магния (12 вес.% Mg - BSTM) и марганца (5, 10 и 15 вес.% Mn) проводилось по разработанной керамической технологии [1], температура спекания керамик составляла 1350 – 1540 °С.

Температурный цикл измерений дифференциальной емкости образцов BSTM состоял в охлаждении образцов от 290 К до 140 К и в нагреве снова до 290 К. На рис.1 приведены зависимости значений разности температур $\Delta T_m = T_{m1} - T_{m2}$, соответствующих максимумам ёмкости при охлаждении и нагревании от скорости изменения температуры. С увеличением скорости изменения температуры параметр температурного гистерезиса ΔT_m возрастает линейно (рис.1). На величину ΔT_m существенное влияние оказывает содержание бария в керамике BSTO.

Обсуждаются механизмы температурного гистерезиса и влияние динамических эффектов. Показано, что в отсутствии внешнего электрического поля температурный гистерезис обусловлен пирозлектрическим эффектом.

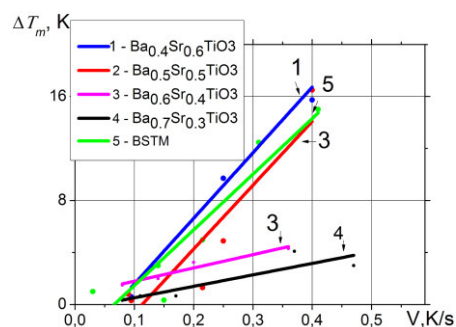


Рис. 1. Экспериментальные зависимости параметра ΔT_m , характеризующего температурный гистерезис, от скорости изменения температуры для образцов различного состава

ЛИТЕРАТУРА

1. Dedyk A.I, Nenasheva E.A., Kanareykin A.D., Pavlova Ju.V.et all., Journal of Electroceramics **17**, 433 (2006).
2. Semenov A.A., Dedyk A.I., Nikitin A.A. at all., J. of Materia

О метастабильной фазе в монокристаллах BaTiO_3

Новик В.К., Малышкина И А., Гаврилова Н Д.

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия
(E-mail: novikmp@orc.ru)

Монокристаллы BaTiO_3 претерпевают три фазовых перехода первого рода, но работы по исследованию метастабильных фаз, сопутствующих этим структурным изменениям, неизвестны. Современная структурная модель исходит из перманентного полярного состояния элементарной ячейки BaTiO_3 с постоянным смещением иона Ti^{4+} в одном из направлений $\langle 111 \rangle$ [1]. В зависимости от температуры, ион Ti^{4+} локализуется в самой глубокой яме одного из четырех двухямных потенциалов по направлениям $\langle 111 \rangle$. Было показано [2], что энергия, необходимая для удержания ионов Ti^{4+} в этом положении, менее необходимой для их удержания в центре кислородного октаэдра. По этой причине структурной единицей, формирующей полярные свойства кристалла единственно подвижками Ti^{4+} по диагоналям, может быть только кластер из восьми полярных элементарных ячеек. В кластере парафазы расположение ионов Ti^{4+} формирует антисегнетоэлектрические компоненты по направлениям «a, b, c» кластера. Физический смысл фазовых переходов состоит в последовательном исключении этих компонент по одному, двум и трем направлениям [2]. На рис. 1 показана зависимость диэлектрической

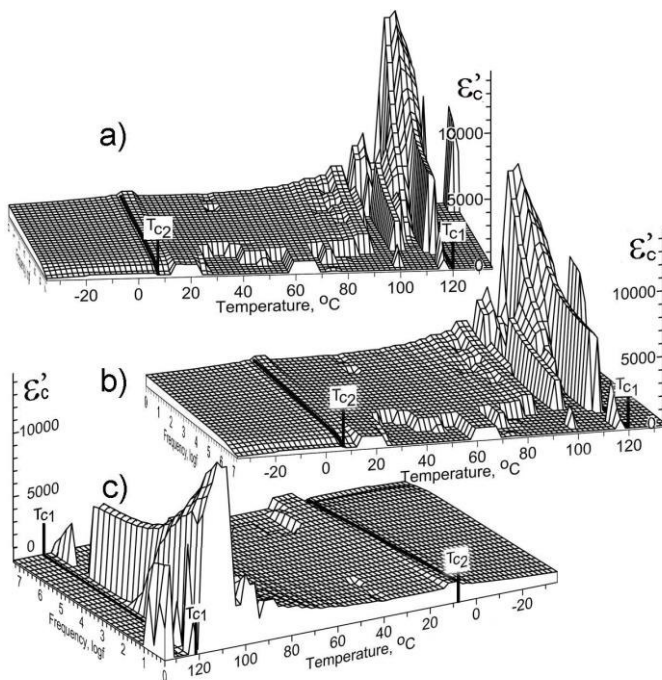


Рис. 1. Зависимость $\epsilon'_c(\log f, T)$ бесцветного, длительно состаренного образца BaTiO_3 , выращенного по методу Ремейки, измеренная при понижении температуры: а, б – вид со стороны высоких частот и низких температур; в – вид со стороны низких частот и высоких температур. $T_{c1}=121^\circ\text{C}$, $T_{c2}=6^\circ\text{C}$.

проницаемости $\epsilon'_c(\log f, T)$ измеренной в режиме, описанном в [3]. Нетрудно видеть, что в области парафазы и в интервале $T_{c1} \div 80^\circ\text{C}$ значения $\epsilon'_c(\log f, T)$ на отдельных участках достигают минимума $\epsilon'_c \approx 10$. Но в том же интервале имеют место проявления фрагментов регулярной тетрагональной фазы, следующие общему контуру классической формы зависимости $\epsilon'_c(\log f, T)$. В интервале $80 \div 20^\circ\text{C}$ наглядны зоны с различной частотой дисперсии (рис. 1 а,б). Сосуществование в интервале $T_{c1} \div 80^\circ\text{C}$ флуктуаций кубической и тетрагональной фаз позволяет рассматривать его как область метастабильной фазы, в которой формируется устойчивое состояние полярного кластера.

В докладе излагаются условия проявления метастабильной фазы, обосновывается ее иденти-

фикация и излагаются особенности ее диэлектрических свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bersuker I. B. *Ferroelectrics*, **164**:1, 75 (1995).
2. Zhang Q.S., Cagin T et al., *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. **103** (40), 14695 (2006).
3. Новик В.К., Лотонов А.М., Гаврилова Н.Д., *ФТТ*, **55**. № 8, 1557 (2013).

Диэлектрические свойства и проводимость протонпроводящих монокристаллов (K_{1-x}(NH₄)_x)₃H(SO₄)₂

Малышкина И.А.¹, Новик В.К.¹, Селезнева Е.В.², Макарова И.П.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, 119991, Россия (E-mail: novikmp@orc.ru)

²ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН Москва, 119333, Россия

В работе изучались новые монокристаллы твердых растворов, полученных в солевой системе K₃H(SO₄)₂–(NH₄)₃H(SO₄)₂–H₂O. Соединения K₃H(SO₄)₂ и (NH₄)₃H(SO₄)₂, не являющиеся кристаллогидратами, известны как суперпротонники, которые при сходстве структуры обладают принципиально различной кинетикой фазового перехода, ответственного за разупорядочение водородных связей, собственно и создающего подвижную, протонную компоненту решетки [1]. Использование растворов K₃H(SO₄)₂ и (NH₄)₃H(SO₄)₂ с различным соотношением приводит к росту кристаллов, отличающихся по структурному типу [2]. При соотношении 3:7 выращенные монокристаллы имеют такой же структурный тип, как и высокотемпературная фаза (NH₄)₃H(SO₄)₂.

Для выяснения влияния замещения на физические свойства кристаллов нами исследовались составы (K_{1-x}(NH₄)_x)₃H(SO₄)₂ при x=0,9; 0,8; 0,7. Выращенные монокристаллы относятся к пространственной группе симметрии R $\bar{3}$. Измерения проводили методом широкополосной диэлектрической спектроскопии при -50÷80°C в диапазоне частот 10¹÷10⁷ Гц.

По результатам исследований обнаружено, что при комнатной температуре величина проводимости σ_{dc} выращенных кристаллов соответствует проводимости исходных соединений при повышенных температурах, а при охлаждении наблюдается аномалия, соответствующая переходу из высокопроводящей в низкопроводящую фазу.

Диэлектрические свойства проанализированы в рамках формализмов комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^*(f,T)$ и комплексного электрического модуля $M^*(f,T)$.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-32-00095 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитричева Е.В., Макарова И.П., Гребенев В.В. //Кристаллография, **60**, 880 (2015).
2. Dmitricheva E. V., Makarova I.P., et al., Solid State Ionics **268**, 68 (2014)

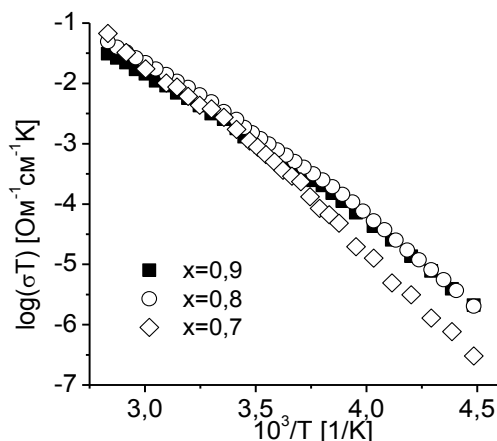


Рис. 1. Температурные зависимости проводимости для (K_{1-x}(NH₄)_x)₃H(SO₄)₂ при x=0,9; 0,8; 0,7.

Пьезоэлектрические и механические свойства микротрубок дифенилаланина, измеренные на полярном срезе

**Нураева А.С.¹, Васильев С.Г.¹, Южаков В.В.¹, Зеленковский П.С.¹,
Копыл С.², Холкин А.Л.^{1,2}, Шур В.Я.¹**

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000 Россия (E-mail: alla.nuraeva@urfu.ru)*

²*Department of Physics & CICECO – Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro, Aveiro, 3810-193 Portugal*

В настоящее время значительное внимание привлекает разработка микро-механических систем на основе биоматериалов. Одними из наиболее перспективных биоматериалов являются микротрубки дипептида дифенилаланина (ДФА), обладающие выраженными пьезоэлектрическими [1], пироэлектрическими [2] и сегнетоэлектрическими [3] свойствами. Недавно было показано, что, благодаря наличию воды в наноканалах, микротрубки ДФА обладают высоким значением модуля Юнга [4]. Однако большинство исследований пьезоэлектрических свойств было проведено на неполярной поверхности микротрубок ДФА, поскольку поляризация направлена вдоль оси микротрубок [5]. Поэтому большой интерес представляют исследования полярного среза микротрубок ДФА.

В данной работе изучались пьезоэлектрические и механические свойства полярной поверхности микротрубок ДФА диаметром до 700 мкм, выращенных из водно-спиртового раствора с увеличенной концентрацией мономеров ДФА (длина более 5 мм). Для проведения измерений микротрубки были нарезаны поперек полярной оси на короткие фрагменты с помощью дисковой пилы.

Оптическая и атомно-силовая микроскопии позволили выявить пористую структуру полярного среза микротрубок ДФА, возможно обусловленную индивидуальными нанотрубками. С помощью силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика при дискретном увеличении модулирующего напряжения, приложенного между зондом (верхним электродом) и проводящей подложкой (нижним электродом), был измерен локальный пьезоэлектрический коэффициент $d_{33}^{local} = 10-20$ пК/Н, величина которого значительно больше, чем в кварце. Впервые проведенные исследования механических свойств микротрубок вдоль полярной оси с помощью нанотвердомера позволили измерить модуль Юнга, величина которого (15 Гпа) близка к полученным ранее расчетным значениям [4].

Полученные результаты не только дополняют ранее проведенные исследования микротрубок ДФА, но и открывают новые возможности для их использования при разработке микроэлектромеханических биосовместимых систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vasilev S., Zelenovskiy P., Vasileva D. et al. J. Phys. Chem. Solids **93**, 68 (2016).
2. Esin A., Baturin I., Nikitin T., Vasilev S. et al. Appl. Phys. Lett. **109**, 142902 (2016).
3. Gan Z., Wu X., Zhu X., and Shen J., Angew. Chem. Int. Ed. Engl. **52**, 2055 (2013).
4. Zelenovskiy P., Kornev I. et al. Phys. Chem. Chem. Phys. **18**, 29681 (2016).
5. Kholkin A. L. et al. ACS Nano **4**, 610 (2010).

Пороговые эффекты в формировании практически важных свойств и эволюции структуры кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$

Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Макарова О.В., Сандлер В.А.

ИХТРЭМС КНЦ РАН, Анатиты, 184209, Россия (E-mail: palat_mn@kolasc.net.ru)

В работе исследована роль концентрационных пороговых эффектов в формировании практически важных свойств и эволюции структуры кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$. В диапазоне концентраций ZnO в расплаве $\sim 4.0 \div 9.0$ мол. % с шагом ~ 1 мол.%, а вблизи пороговой концентрации ~ 6.76 мол. % с шагом ~ 0.1 мол.% исследованы физико-химические характеристики системы кристалл-расплав. Определены три концентрационных участка, на которых с увеличением концентрации ZnO происходит изменение физико-химических свойств расплава, и, как следствие, изменение физических характеристик кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$. Уточнено значение основной пороговой концентрации $\text{ZnO} \sim 6.76$ мол.% в расплаве. Методами спектроскопии КРС и полнопрофильного анализа рентгенограмм изучена эволюция структуры кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ в диапазоне концентраций $\sim 4.0 \div 9.0$ мол. % ZnO в расплаве. В области основного концентрационного порога (~ 6.76 мол. % ZnO) происходит резкое изменение условий образования и вторичной структуры кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$. Благоприятные условия для выращивания оптически и композиционно однородных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ находятся в диапазоне концентраций $\text{ZnO} \sim 5.4 \leq C_p \leq 6.76$ мол. %. При $C_p > \sim 6.8$ мол. %, если кристаллизуется $\geq 20\%$ расплава, вырастают сильно дефектные кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$, содержащие две различные кристаллические фазы: $\text{Li}_6\text{ZnNb}_4\text{O}_{14}$ и LiNbO_3 . То есть, при концентрации ZnO в расплаве $> \sim 6.8$ мол. % ZnO получить композиционно и оптически однородные кристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$ невозможно. Таким образом, несмотря на то, что при концентрациях ZnO в расплаве $> \sim 6.8$ мол. % в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ происходит наиболее полное подавление фоторефракции, для практических приложений предпочтительней использовать кристаллы, выращенные из допороговых расплавов ($\text{ZnO} \sim 5.4 \leq C_p \leq 6.76$ мол. %). Установлено, что ввиду существенного различия физико-химических характеристик расплавов разного состава и резкого изменения $K_{\text{распр.}}$ с изменением концентрации ZnO в расплаве возможно получение кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$, имеющих существенно разную дефектную структуру и свойства и одинаковую концентрацию легирующей добавки. В исходно полидоменных и монодоменных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ обнаружено увеличение спонтанной униполярности, как результат бесполевого высокотемпературного отжига кристаллов. Эффект сопровождается проявлением низкочастотной диэлектрической дисперсии и скачкообразными аномалиями на температурных зависимостях проводимости и диэлектрической проницаемости. При этом величина пьезомодуля d_{333} существенно увеличивается. Величина скачка пьезомодуля Δd_{333} линейно возрастает с увеличением скачка удельной проводимости $\Delta \sigma$ вблизи температуры $T^* \approx 800\text{K}$. При исследовании диэлектрических, пьезоэлектрических свойства и проводимости полидоменных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ в диапазоне концентраций легирующей добавки ($\sim 4.0 < C_p \leq 9.0$ мол.% ZnO) показано, что эффект существенного увеличения униполярности при высокотемпературном отжиге характерен только для кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$, выращенных из расплавов в допороговой области концентраций ($\sim 5.4 < C_p \leq 6.76$ мол.% ZnO).

Влияние механической активации на получение и свойства материалов на основе системы $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3-x(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)\text{TiO}_3$

Половинкин Б.С., Таланов М.В., Шилкина Л.А., Вербенко И.А.

*Южный федеральный университет Научно-исследовательский институт физики,
Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: polo-sb@yandex.ru)*

Сегнетопъезокерамические материалы на основе системы твердых растворов (ТР) цирконата-титаната свинца, $\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$ (ЦТС), благодаря своим уникальным электро-механическим свойствам [1], являются одной из основ современной высокоточной электроники, робототехники и адаптивного регулирования в приборостроении. Однако, из-за токсичности соединений свинца [2], использование ЦТС в электронном оборудовании находится под постоянной угрозой запрета. Вследствие этого в настоящее время все большее внимание уделяется разработке альтернативных бессвинцовых материалов.

Одна из наиболее изученных бессвинцовых многокомпонентных систем, образованная ТР цирконата-титаната бария и цирконата-титаната кальция $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3-x(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)\text{TiO}_3$ (BCZT), также как и ЦТС, отличается высокими пьезоэлектрическими свойствами [3]. Однако, вследствие низкой активности исходных компонентов, получение ТР BCZT требует использования экстремально высоких температур синтеза и спекания, что сопряжено с неизбежными потерями компонентов в результате протекания побочных физико-химических процессов, необходимостью применения дорогостоящего нагревательного оборудования, быстрым износом технологической оснастки. Это вынуждает отнести ТР BCZT к классу труднополучаемых, нетехнологичных материалов. Одним из наиболее эффективных и простых способов снижения температур синтеза и спекания является механоактивация.

Настоящая работа посвящена установлению корреляционных связей между режимами механоактивации, температурами синтеза и спекания, и электрофизическими свойствами ТР системы BCZT, полученных на основе стандартной керамической технологии из оксидов TiO_2 и ZrO_2 , марки «осч» и «ч», и карбонатов CaCO_3 и BaCO_3 , марки «чда». Механоактивацию проводили в шаровой планетарной мельнице АГО-2. На всех стадиях использовались рентгенографические исследования на дифрактометре ДРОН-3 с использованием $\text{Co}_{K\alpha}$ – излучения. В работе будет предложена новая методика, обеспечивающая оптимизацию процесса получения высокоэффективных материалов на основе ТР BCZT и создающая дополнительные возможности для контроля их электрофизических параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.А. Randall, A. Kelnberger, G.Y. Yang, Highstrain piezoelectric multilayer actuators—a material science and engineering challenge, J. Electroceram. 14, 177–191 (2005).
2. Official Journal of the European Union. L 174, 74 – 87 (2011).
3. L. Wenfeng, R. Xiaobing, Large piezoelectric effect in Pb-free ceramics, PRL. 103, 1-4 (2009).

Термополяризационные явления в области температур стеклования (размягчения) аморфного полидиэтилсилоксана

Попов И.В.

Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I
Воронеж, 394087, Россия (E-mail: iblackmore68@gmail.com)

Все известные структурные переходы кристаллических полиморфных модификаций полидиэтилсилоксана (ПДЭС) сопровождаются ярко выраженными термополяризационными эффектами [1]. Экспериментально установлено, что при нагревании образца ПДЭС, полученного охлаждением из аморфного состояния в отсутствие внешнего поля, в области температур

перехода в высокоэластическое состояние также фиксируется пик плотности тока ТСД (рис.1). При этом, указанный переход в ПДЭС не отражается заметным образом на характере температурных зависимостей относительной диэлектрической проницаемости ϵ' , тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$, удельной объемной электропроводности γ_v в температурном интервале 100К ÷ 190К. Т.о., данные макроскопические характеристики диэлектрика практически полностью обуславливаются кристаллической фазой полимера в указанном диапазоне температур. Важно отметить, что у ПДЭС, закристаллизованного из мезофазного состояния (образец выдерживали при температуре 293 К в течение 1 часа), не обнаруживается пика на термограмме тока ТСД, связанного с переходом полимера из стеклообразного в высокоэластическое состояние.

ПДЭС частично кристаллизуется даже при очень большой скорости охлаждения [2], и процесс кристаллизации, по-видимому, может иметь место при любой температуре T_g (стеклование) $< T < T_m$ (плавление кристалла). Максимальное значение плотности тока ТСД напрямую зависит от содержания аморфной фазы в полимере. Существование пика тока ТСД при отсутствии предварительной поляризации само по себе является нетривиальным фактом, и, очевидно, характерно только для гибкоцепных полимеров, у которых структурные единицы обладают пироэлектрическими свойствами.

ПДЭС частично кристаллизуется даже при очень большой скорости охлаждения [2], и процесс кристаллизации, по-видимому, может иметь место при любой температуре T_g (стеклование) $< T < T_m$ (плавление кристалла). Максимальное значение плотности тока ТСД напрямую зависит от содержания аморфной фазы в полимере. Существование пика тока ТСД при отсутствии предварительной поляризации само по себе является нетривиальным фактом, и, очевидно, характерно только для гибкоцепных полимеров, у которых структурные единицы обладают пироэлектрическими свойствами.

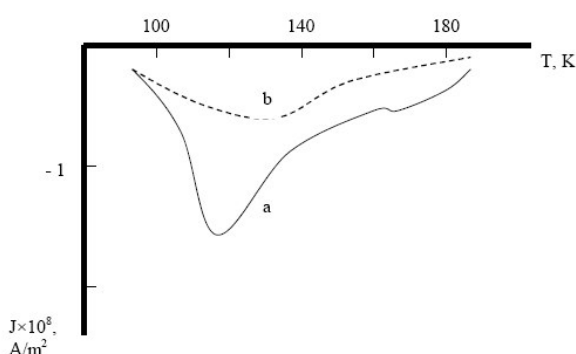


Рис. 1. Термограмма токов термостимулированной депольризации (ТСД) образца ПДЭС в интервале 100К ÷ 190 К, полученная в отсутствие внешнего электрического поля: (a) - первый цикл охлаждения-нагрев; (b) - десятый цикл

ЛИТЕРАТУРА

1. Voischchev V.S., Popov I.V., Sazhin B.I. et.al. Polymer Science. A **41**, 311 (1999).
2. Papkov V.S., Svistunov V.S., and Godovsky Y.K. Journal of Polymer Science. Part B - Polymer Physics **25**, 1859 (1987).

Аномалии электрофизических параметров прозрачной сегнетопъезокерамики ЦТСЛ в окрестности размытого фазового перехода

**Резниченко А.Н., Петрова Е.И., Науменко А.А., Швецова Н.А.,
Рыбьянец А.Н.**

*Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки,
194 (E-mail: reznichenkoan@yahoo.com)*

Сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом (ФП) в силу своих особых свойств являются перспективными для применений в различных отраслях современной техники. Интерес к разработке и исследованию сегнетоэлектриков с размытым ФП обусловлен не только поиском ответов на фундаментальные вопросы о физической природе стеклодипольного состояния и процессов, протекающих в сегнетоэлектриках при размытых ФП, но и возможностью их практического применения.

Среди известных сегнетоэлектриков с размытым ФП наибольший практический и теоретический интерес представляют сегнетопъезокерамики системы ЦТСЛ (Х/65/35), демонстрирующие широкий спектр электрофизических параметров и являющиеся уникальным объектом моделирования процессов, происходящих в сегнетоэлектриках с размытым ФП. Однако, несмотря на длительные исследования, комплексные параметры сегнетопъезокерамик системы ЦТСЛ (Х/65/35), а также особенности распространения ультразвуковых волн в окрестности размытого ФП, до настоящего времени практически не исследовались.

Основной задачей настоящей работы являлось исследование аномалий электрофизических параметров сегнетопъезокерамик системы ЦТСЛ (Х/65/35) в окрестности размытого ФП, а также измерение наборов комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров в широком диапазоне частот.

В качестве объекта исследования были выбраны сегнетопъезокерамики системы $(\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x)(\text{Zr}_{0,65}\text{Ti}_{0,35})\text{O}_3$ с содержанием лантана $x = 7,5 - 8,5\%$. Экспериментальные образцы сегнетопъезокерамик получались методом горячего прессования. Комплексные параметры экспериментальных образцов определялись методом анализа пьезорезонансных спектров с использованием программного пакета PRAP. В результате выполненных исследований получен набор комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров прозрачной сегнетопъезокерамики $(\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x)(\text{Zr}_{0,65}\text{Ti}_{0,35})\text{O}_3$. Измерены частотные зависимости указанных параметров в диапазоне до 20 МГц.

Обнаружены аномалии в поведении скорости звука и затухания поверхностных акустических волн в области температуры T_d , расположенной ниже точки Кюри и соответствующей дополнительным максимумам диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. В соответствии с принятыми представлениями о размытом ФП в ЦТСЛ наблюдаемые аномалии параметров распространения поверхностных акустических волн в сегнетопъезокерамике ЦТСЛ (Х/65/35) в области температуры T_d , интерпретированы нами как результат исчезновения дальнего сегнетоэлектрического порядка и разрушения наведенного поляризацией макродоменного состояния.

Комплексные электрофизические параметры бесвинцовых сегнетопъезокерамик на основе твердых растворов ниобата-натрия лития

**Рыбьянец А.Н., Луговая М.А., Резниченко Л.А., Науменко А.А.,
Резниченко А.Н.**

*Южный федеральный университет Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194
(E-mail: arybyanets@gmail.com)*

Интерес к бесвинцовым сегнетопъезокерамикам связан, главным образом, со все возрастающим вниманием к экологическим проблемам. Однако представляется весьма сомнительным, что какая-либо новая пьезокерамическая система, не содержащая свинца и обладающая пьезоэлектрическими свойствами близкими к свойствам системы ЦТС, будет найдена в ближайшее время. Поэтому интерес исследователей в настоящее время концентрируется на известных бесвинцовых композициях. Исследования по бесвинцовым пьезоэлектрикам, выполненные в университетах США и Японии, позволили определить полезные пьезоэлектрические композиции в системе $(\text{Na}_{1-x}\text{Bi}_x)\text{TiO}_3$. Другими кандидатами среди бесвинцовых систем являются перовскиты на основе ниобатов щелочных металлов, слоистые висмутсодержащие соединения $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ и вольфрамовые бронзы $(\text{Sr},\text{Ba})\text{Nb}_2\text{O}_6$. Среди известных бесвинцовых керамик на основе ниобатов щелочных металлов наибольший практический интерес представляют сегнетопъезокерамики на основе твердых растворов $(\text{Na},\text{Li})\text{NbO}_3$, демонстрирующие низкие значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 \approx 150$) и плотности ($\rho \approx 4500$ г/см³) при высоких значениях механической добротности ($Q_m \approx 1000$) и пьезоэлектрических параметров ($d_{33} \approx 40$ пКл/Н). Такой набор параметров делает ниобатные бесвинцовые сегнетопъезокерамики конкурентоспособными и перспективными для ряда высокочастотных ультразвуковых применений. Однако, несмотря на длительные исследования, высокочастотные свойства бесвинцовых сегнетопъезокерамик до настоящего времени практически не исследовались.

Задачей настоящей работы являлось измерение параметров бесвинцовых сегнетопъезокерамик в широком диапазоне частот. В качестве объекта исследования был выбран твердый раствор системы $(\text{Na},\text{Li})\text{NbO}_3$ следующего состава – $\text{Na}_{0,86625}\text{Li}_{0,12375}\text{Sr}_{0,01}\text{Nb}_{0,988}\text{Al}_{0,01}\text{O}_{2,995}$. Экспериментальные образцы сегнетопъезокерамик получались методом горячего прессования. Микроструктурные исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа (НИТАСНІ ТМ 1000) и оптического микроскопа (NeoPhot-21).

В результате выполненных исследований получен полный набор комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров бесвинцовой сегнетопъезокерамики $\text{Na}_{0,86625}\text{Li}_{0,12375}\text{Sr}_{0,01}\text{Nb}_{0,988}\text{Al}_{0,01}\text{O}_{2,995}$. Исследованы также частотные зависимости указанных параметров в частотном диапазоне до 100 МГц. Показано, что исследованные бесвинцовые сегнетопъезокерамики характеризуются низким затуханием ультразвуковых волн и отсутствием дисперсии в широком диапазоне частот и могут быть использованы в высокочастотных ультразвуковых преобразователях для медицинской техники и неразрушающего контроля.

Исследование кластерообразования в кристаллах ниобата лития

Воскресенский В.М., Стародуб О.Р., Сидоров Н.В., Палатников М.Н.

*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, 184209, Россия
(E-mail: ol_star@mail.ru)*

Искусственное формирование в структуре кристалла микро- и макронеоднородностей фрактального типа или периодически поляризованных микро- и наноструктур предоставляет уникальную возможность увязать кристаллохимию с нанотехнологиями, создавая структурированные кристаллические материалы с заранее заданными свойствами. Микро- и наноструктуры различного типа можно, в частности, успешно формировать в нелинейно-оптическом монокристалле ниобата лития [1].

В рамках полуклассической атомистической модели методом компьютерного моделирования были выполнены расчеты полной энергии взаимодействия в кислородно-октаэдрическом кластере с использованием программы KeClast [2] и разработанного нами комплекса программ минимизации энергии с выявлением так называемых «критических» атомов, «мешающих» равновесию системы [3]. В данной работе впервые обоснован такой подход к расчету кластеров в структуре кристалла ниобата лития, когда за структурную единицу берется не элементарная ячейка, а кислородный октаэдр. Это позволяет сохранить электронейтральность кластера и не допустить разорванности структуры (кислородных октаэдров) на границах кластера. Основанием рассчитываемого кластера являлся правильный шестигранник со стороной, состоящей из 10 элементов налагаемой расчётной сетки структуры кристалла стехиометрического состава и высотой в 20 октаэдрических слоёв. После минимизации энергии сформированного модельного кластера анализировались полученные структуры с учётом выполнения условия электронейтральности.

Расчёты показали, что существует размер кластера, имеющий минимум энергии, внутри которого организуется определённая структура, стремящаяся к структуре конгруэнтного кристалла ниобата лития. Из расчётов видно, что кластер стехиометрического состава не может существовать, поскольку сохранение электронейтральности оказывается невозможным. В каждом рассчитываемом случае отношение Li/Nb в результате оптимизации падает примерно на 0.3–0.35, что следует учитывать при росте кристаллов. Доля стехиометрической структуры в кластере оказывается примерно одинаковой, лишь немного снижаясь при увеличении соотношения Li/Nb. Однако, полученная после оптимизации энергия кластера имеет явно выраженный минимум как раз при близком к конгруэнтному отношению Li/Nb, что подтверждается экспериментальными данными о максимальной устойчивости структуры именно конгруэнтного кристалла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербина О.Б., Палатников М.Н., Коханчик Л.С. Синтез и свойства кристаллов LiNbO₃ и LiTaO₃ с микро- и наноструктурами – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing. 2013. 141 с. ISBN: 978-3-659-38894-1.
2. Лобов Д.В. Структура наноразмерных частиц минералов по данным компьютерного и рентгенографического экспериментов: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 2005.
3. Воскресенский В.М., Стародуб О.Р., Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Маврин Б.Н. Кристаллография **56**, № 2, 246 (2011).

Диэлектрические, пьезоэлектрические и механические свойства композита сополимера П(ВДФ-ТрФЭ) с углеродными нанотрубками

Силибин М.В.¹, Киселев Д.А.^{1,2}, Солнышкин А.В.^{1,3}, Карпинский Д.В.¹, Сыса А.В.¹, Бдикин И.К.¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498 Зеленоград, Москва, Россия (E-mail: sil_m@mail.ru)

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский пр. 4, 119049, Москва, Россия (E-mail: dm.kiselev@gmail.com)

³Тверской государственный университет, 170100, Тверь, Россия

Для улучшения механических и электрических свойств многих органических материалов в последнее время исследуются углеродные материалы, такие как углеродные нанотрубки [1] и плоские однослойные углеродные структуры (графен) [2]. Благодаря своим уникальным электронным и механическим свойствам, атомный слой из sp²-гибридизированных углеродных атомов с двумерной гексагональной решеткой, формирующийся в углеродных нанотрубках (УНТ) и графене, может быть ключевым элементом в устройствах терагерцовых длин волн и СВЧ [3]. В настоящей работе представлены результаты исследований диэлектрических, пьезоэлектрических и механических свойств пленок как чистого сополимера поли(винилиденфторид-трифторэтилен) П(ВДФ-ТрФЭ), так и сополимера П(ВДФ-ТрФЭ) с включениями 2% углеродных нанотрубок (П(ВДФ-ТрФЭ)+2%УНТ).

Пленочные композитные пленки толщиной ~30 мкм на основе сополимера П(ВДФ-ТрФЭ), как чистого состава, так и с добавлением 2% углеродных нанотрубок синтезированы методом кристаллизации из раствора. Температурные исследования показали, что увеличение диэлектрической проницаемости композитных образцов обусловлено наличием проводящих включений в виде углеродных нанотрубок. Возможной причиной наблюдаемого при нагреве сдвига температуры фазового перехода является возникновение миграционной поляризации за счет накопления зарядов на границе раздела «полимер-УНТ». Методами сканирующей зондовой микроскопии визуализированы поверхности и получены значения среднеквадратичной шероховатости исследуемых сополимеров. Установлено, что внедрение в сополимер П(ВДФ-ТрФЭ) углеродных нанотрубок приводит к уменьшению значения шероховатости поверхности. В режиме спектроскопии переключения локальной поляризации получены петли пьезоэлектрического гистерезиса. Расчеты показали, что для чистого сополимера П(ВДФ-ТрФЭ) значения эффективного пьезоэлектрического коэффициента d_{33} составили 5 пм/В, а для образца с добавлением 2%УНТ $d_{33}=30$ пм/В. Таким образом, проведенные эксперименты как на макро, так и на локальном уровне показали, что включение углеродных нанотрубок в сополимер П(ВДФ-ТрФЭ) улучшают его диэлектрические и пьезоэлектрические характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда проект № 16-19-10112.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chae S.H., and Young H.L. Nano Convergence **1**(1), 15 (2014).
2. Geim A. K. Science **324**(5934), 1530 (2009).
3. Chen D. et al., Composites Science and Technology **102**, 126 (2014).

Диэлектрические и упругие свойства в области размытого структурного фазового перехода в многокомпонентной системе на основе ЦТС

Скрылёв А.В.¹, Бурханов А.И.², Акбаева Г.М.³, Панич А.Е.¹

¹Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, 344090, Россия, (E-mail: skrylyov@sfedu.ru)

²Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

³Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия

Известно, что многокомпонентная сегнетомягкая пьезокерамика [1] может занимать “промежуточное” положение между сегнетоэлектриком и релаксором и, вследствие этого, обладать необычными свойствами, что ставит ее в ряд перспективных материалов как для прикладных применений, так и для фундаментальных исследований [2]. В настоящей работе исследовался состав $\text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3 - \text{PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3 - \text{PbW}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}\text{O}_3 - \text{PbW}_{3.5}\text{Li}_{2/5}\text{O}_3 + \text{Yb}_2\text{O}_3$, полученный методом горячего прессования. Исследуемый материал относится к пятикомпонентной системе сегнетомягких материалов, которые обладают релаксорными свойствами, а также имеют низкотемпературный фазовый переход между двумя ромбоэдрическими фазами $\text{R3c} \rightarrow \text{R3m}$.

Изучение диэлектрического отклика осуществлялось на основе анализа петель поляризации, полученных на частотах 1 – 10 Гц с применением модифицированной схемы Соьера–Тауэра. Измерение скорости продольных звуковых волн осуществлялось с помощью резонансного метода на образцах, изготовленных в виде малых брусков длиной 15 мм и толщиной 2 мм. с серебряными электродами на больших гранях образца.

Рисунок демонстрирует поведение температурных зависимостей продольной скорости ультразвуковой волны (v) и коэффициента поглощения (α) в области структурного фазового перехода в предварительно поляризованной керамике. Данные зависимости иллюстрируют, как в поляризованной керамике проявляется «классический» сегнетоэлектрик. В работе на основе сопоставления результатов характера нелинейности диэлектрического отклика и упругих свойств обсуждаются процессы перехода от чистого сегнетоэлектрика, где основные переполаризационные свойства обуславливаются динамикой доменов, к отклику релаксорного материала, когда большую роль начинают играть фазовые границы.

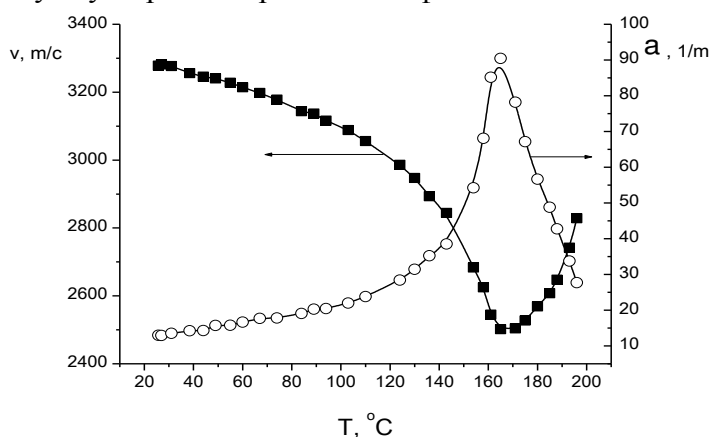


Рис. 1 - Зависимости скорости звука (v) и коэффициента поглощения (α) от температуры

ЛИТЕРАТУРА

1. G.M. Akbaeva, A.Ya. Dantsiger, O.N. Razumovskaya //Proceedings of the International Conference “Electroceramics – IV” – Aachen, Germany, 1994. – V. 1. – Aachen, 1994. – P. 535–538.
2. Е.В. Милов, Г.М. Акбаева, В.Г. Гавриляченко, А.Ф.Семенчев // Физика тверд. тела. – 2012. – Т. 54, № 5. – С.878–879.

Ионная проводимость сегнетоэлектрических кристаллов KTiOPO_4 “as grown” и после высокотемпературного отжига в вакууме

Сорокин Н.И., Шалдин Ю.В., Новикова Н.Е.

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва 119333, Россия (E-mail: nsorokin1@yandex.ru)

Кристаллы KTiOPO_4 (КТР) относятся к классу функциональных материалов, проявляющих уникальные физические свойства. Сегнетоэлектрические монокристаллы КТР (пр. гр. $R\bar{3}m2_1$) обладают высокой ионной проводимостью вдоль полярной оси c ($\sigma_{\parallel c}$). Структура КТР представляет собой жесткий трехмерный каркас, состоящий из связанных вершинами TiO_6 -октаэдров и PO_4 -тетраэдров. В каркасе имеются широкие винтообразные каналы, вытянутые вдоль оси c , в которых размещаются щелочные катионы. Наличие дополнительных позиций катионов K^+ в каналах структуры и их неполная заселенность [1] обеспечивают возможность ионного транспорта в кристалле. Высокоомные монокристаллы КТР, обладающие малой концентрацией дефектов, применяют для создания нелинейно-оптических элементов в оптоэлектронике и лазерной физике. Проведены исследования проводимости монокристаллов КТР фирмы Raicol Crystals, Israel [2] (точка Кюри $T_C = 1220$ К), в состоянии “as grown” и после отжига в вакууме при 1000 К в течение 10 ч. Параметры ромбической элементарной ячейки кристаллов КТР составляют $a = 12.814(1)$, $b = 6.404(1)$, $c = 10.589(1)$ Å. Электропроводность σ на постоянном токе определяли методом импедансной спектроскопии ($5\text{--}5 \times 10^5$ Гц) в вакууме (~ 1 Па). Измерения выполнены в интервале температур 293–833 К.

Для кристалла “as grown” при 573 К отношение проводимостей $\sigma_{\parallel c}/\sigma_{\perp c} \sim 10^2$ и $\sigma_{\parallel c} = 1 \times 10^{-5}$ См/см (рис. 1). После отжига кристалла значения $\sigma_{\parallel c}$ возрастают в ~ 20 раз, при этом отношение $\sigma_{\parallel c}/\sigma_{\perp c}$ увеличивается в $\sim 10^3$ раз. Таким образом, на величину ионной проводимости кристаллов КТР существенно влияние оказывает их термическая предыстория. Ионная проводимость кристаллов КТР связана с образованием в процессе их роста вакансий в позициях щелочных катионов (подвижные носители заряда) и кислорода: $\text{KTiOPO}_4 \rightarrow \text{K}_{1-x}\text{TiOPO}_{4-x/2} + (x/2)\text{K}_2\text{O}$. Отжиг кристаллов в вакууме приводит к удалению кислорода из кристалла, а, следовательно, к увеличению количества вакансий калия и росту проводимости. Ионная проводимость является индикатором изменения дефектности структуры монокристаллов КТР.

Авторы благодарят М. Цейтлина и М. Рота за предоставленные кристаллы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новикова Н.Е., Верин И.А., Сорокина Н.И. и др., Кристаллография **53**, 999 (2008).
2. www.raicol.com.

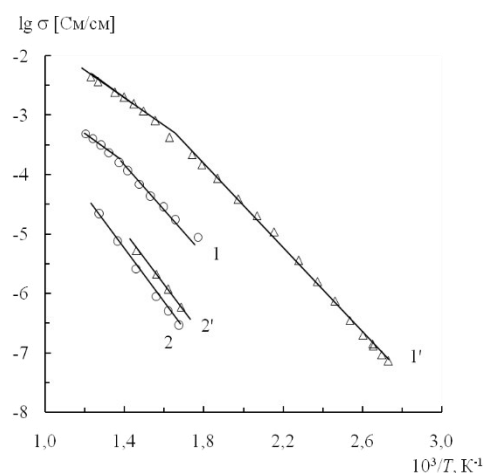


Рис. 1. Зависимости $\sigma(T)$ кристаллов KTiOPO_4 “as grown” (1 – $\sigma_{\parallel c}$, 2 – $\sigma_{\perp c}$), и отожженного (1' – $\sigma_{\parallel c}$, 2' – $\sigma_{\perp c}$).

Особенности диэлектрических спектров кристалла ТГС при нагреве и охлаждении

Овчинникова Г.И.², Иванова Е.С.¹, Еремеев А.П.^{1,2}, Белугина Н.В.¹,
Толстихина А.Л.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, стр.2, Россия
(E-mail: alla@ns.crys.ras.ru)

²Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия, 119333, Москва, Ленинский пр., 59, Россия

Диэлектрическая спектроскопия, как метод исследования коллективных движений сильно коррелированных групп электрических диполей при их обмене с термостатом – основной решеткой [1], представляет мощный метод исследования сегнетоэлектриков. Релаксационная поляризация, определяемая флуктуационно – активационными процессами в материале [2], обычно исследуется в широком диапазоне температур и частот, однако до сих пор нет полного понимания механизмов релаксационной диэлектрической дисперсии.

В работе исследована диэлектрическая проницаемость классического сегнетоэлектрического кристалла ТГС в области релаксационной дисперсии дебаевского типа в диапазоне частот $10^2 - 10^6$ Гц. Измерения проводили в режимах нагрева и охлаждения при ступенчатом изменении температуры от комнатной до 60°C и обратно с высокой степенью стабилизации в каждой точке. Время установления температуры, особенно вблизи фазового перехода, составляло один час и более. Анализировали температурно–частотные зависимости диэлектрической проницаемости $\epsilon'(T)$ и диэлектрических потерь $\epsilon''(T)$. В обоих режимах измерений обнаружена дисперсия диэлектрической проницаемости и потерь, но поведение ее при нагреве и охлаждении сильно различалось, как величиной диэлектрического отклика, так и типом дисперсии.

Анализ экспериментальных зависимостей проводили на основе модели динамической проводимости [3], которая позволяет учесть вклад в диэлектрический отклик всех основных механизмов дисперсии. В этой модели основными, изменяющимися с температурой параметрами, являются: частота осцилляций ω_0 , затухание γ , связанное с основной кристаллической решеткой, и время локализации диффундирующих частиц τ . Изменяя затухание γ , можно следить за связью диполей с основной решеткой, а изменяя τ – за разупорядочением системы. Феноменологическая модель динамической проводимости позволила не только описать экспериментальные диэлектрические спектры, но и выяснить, каким образом связь диполей с основной решеткой изменяет характер диэлектрического отклика сегнетоэлектрика TGS в режимах нагрева и охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нигматуллин Р.Р., НТЖ Георесурсы **17**, 2, 7 (2005).
2. Потапов А.А. Ориентационная поляризация. Поиск оптимальных моделей. Новосибирск. Наука. 335 (2000).
3. Волков А.А., Козлов Г.В., Лебедев С.П., Ракитин А.С. ФТТ. **32**. № 2. 1 (1990).

Полиморфизм и свойства кислородпроводящих соединений в тройных системах $\text{V}_2\text{O}_3\text{-Nd}(\text{Pr})_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$

Харитонов Е.П.¹, Орлова Е.И.¹, Воронкова В.И.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова Москва, 119991, Россия (E-mail: harit@polly.phys.msu.ru)

Оксид висмута V_2O_3 и соединения на его основе привлекают внимание в связи с высокой проводимостью по кислороду близкой к 0.1 - 1 См/см. Бесприемный V_2O_3 имеет четыре основные полиморфные модификации [1]: 1) моноклинная фаза $\alpha\text{-V}_2\text{O}_3$, стабильная при комнатной температуре; 2) тетрагональная фаза $\beta\text{-V}_2\text{O}_3$; 3) кубическая фаза $\gamma\text{-V}_2\text{O}_3$; 4) высокотемпературная кубическая фаза $\delta\text{-V}_2\text{O}_3$, существующая в узком интервале температур 700-780 °С и обладающая экстремально высокой кислородной проводимостью, порядка 3 См/см [2]. Основное внимание в литературе уделяется вопросу о стабилизации кислородпроводящей кубической фазы $\delta\text{-V}_2\text{O}_3$, при этом наилучшие результаты достигаются при содопировании двумя различными катионами, например, W и Ln = Dy, Er. Полиморфизм и свойства других фаз V_2O_3 изучены слабо.

В данной работе предполагается исследовать вопрос о стабилизации различных фаз V_2O_3 при использовании примесей Nd, Pr и Mo в качестве содопантов. Будут изучены полиморфизм и электрофизические свойства полученных соединений.

Поликристаллические образцы в тройных системах $\text{V}_2\text{O}_3\text{-Pr}_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$ и $\text{V}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$ были получены методом твердофазного синтеза на воздухе. По данным рентгеновского фазового анализа в указанных системах в области 33-90 мол.% V_2O_3 образуются широкие поля соединений со структурой кубической фазы $\delta\text{-V}_2\text{O}_3$. В узкой области 92-96 мол.% V_2O_3 наблюдаются твердые растворы с тетрагональной структурой $\beta\text{-V}_2\text{O}_3$. Еще одна тетрагональная фаза (далее фаза $\beta_1\text{-V}_2\text{O}_3$) формируется в тройных системах в области 40-60 мол.% V_2O_3 при избытке молибдена.

По данным калориметрии у соединений с тетрагональной структурой $\beta\text{-V}_2\text{O}_3$ при нагревании наблюдаются два фазовых перехода, $\beta \rightarrow \alpha$ (630 - 640 °С) и $\alpha \rightarrow \delta$ (700 - 720 °С). При охлаждении проявляется единственный переход, $\delta \rightarrow \beta$ (500 - 550 °С). Указанные переходы сопровождаются скачками электропроводности на 1 - 2 порядка величины. Тетрагональные образцы в фазе $\beta_1\text{-V}_2\text{O}_3$ претерпевают обратимый фазовый переход первого рода $\beta_1 \leftrightarrow \delta$ в области 900 - 1100 °С. Данный фазовый переход не проявляется на кривых проводимости, однако он сопровождается интенсивным λ -пиком диэлектрической проницаемости, характерным для сегнето- или антисегнетоэлектрических фазовых переходов. Тетрагональные (β_1 -фаза) и кубические образцы демонстрируют высокую электропроводность, достигающую значений 0.05 - 0.5 См/см при 800 °С. Величина электропроводности возрастает при повышении содержания висмута. По аналогии с бесприемным V_2O_3 можно полагать, что проводимость допированных соединений носит преимущественно кислородный характер.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (грант № 15-02-03492).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kharton V.V., Naumovich E.N., Yaremchenko A.A., Marques F.M.B. J. Solid State Electrochem. **5**, 160 (2001).
2. Takahashi T., Iwahara H., Nagai Y. J. Appl. Electrochem. **2**, 97 (1972).

Кристаллическая структура и микроструктура керамоматричных композиционных материалов

Швецова Н.А., Константинов Г.М., Науменко А.А., Рыбьянец А.Н.

Южный федеральный университет Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194
(E-mail: yfnfif_71@bk.ru)

Анализ научно-технической и патентной литературы [1] показывает, что свойства сегнетопьезоэлектрических материалов остаются лимитирующим фактором при разработке ультразвуковых преобразователей и пьезоустройств. Направленное изменение этих свойств с целью достижения экстремальных физических параметров активных материалов может обеспечить качественное улучшение функциональных характеристик приборов и устройств. В связи с этим актуален переход к многокомпонентным, структурированным на различных масштабных уровнях композиционным материалам, сочетающим принципиально различные физические свойства.

Целью настоящей работы являлось исследование кристаллической структуры и микроструктурных особенностей керамоматричных композиционных материалов «керамика-керамика» и «керамика-кристалл» различного состава. В качестве объектов исследования были выбраны керамоматричные композиты с активными компонентами на основе ЦТС, полученные по обычной керамической технологии. В качестве наполнителя использовались предварительно спеченные гранулы сегнетопьезокерамик ЦТС различного состава, а также кристаллические порошки Al_2O_3 , $LiNbO_3$, ZnO различной дисперсности. Микроструктурные исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа (НИТАСНИ ТМ 1000) и оптического микроскопа (NeoPhot-21). Структурные параметры экспериментальных образцов определялись с помощью рентгеновского дифрактометра Дрон 7.

В результате выполненных исследований установлены корреляционные связи кристаллической структуры, микроструктурных особенностей, условий получения и электрофизических свойств керамоматричных композитов «керамика-керамика» и «керамика-кристалл». Установлено, что определяющую роль в формировании результирующих свойств керамоматричных композитов наряду с влиянием свойств и структуры пьезокерамической матрицы и керамического/кристаллического наполнителя играет возникающая при спекании микропористость пьезокерамической матрицы.

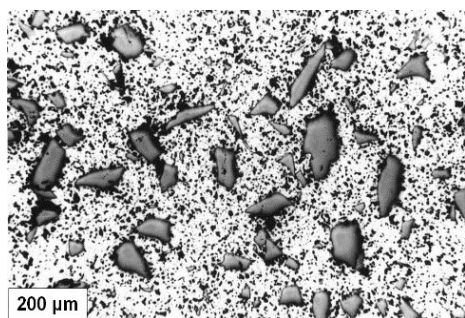


Рис. 1. Микроструктура керамоматричного композита ЦТС/ Al_2O_3 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Rybyanets A.N. In: *Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics*. **175**, Chapter 15, 211 (2016).

Исследование зависимости упругих и пьезоэлектрических свойств микротрубок дифенилаланина от содержания воды

Южаков В.В.¹, Васильев С.Г.¹, Зеленковский П.С.¹, Холкин А.Л.^{1,2}, Шур В.Я.¹

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: vladimir.yuzhakoff@mail.ru)*

²*Department of Physics & CICECO – Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro, Aveiro, 3810-193 Portugal*

Микротрубки, получаемые самосборкой дифенилаланина ($C_{18}H_{20}N_2O_3$, ДФА), являются перспективным материалом для биосовместимых элементов медицинской техники [1], благодаря выраженным пьезоэлектрическим [2], пироэлектрическим [3] и сегнетоэлектрическим [4] свойствам. Однако влияние воды на их свойства изучено недостаточно. В данной работе исследованы модуль Юнга и пьезоэлектрический коэффициент в микротрубках ДФА с различным содержанием воды.

Микротрубки ДФА были выращены из раствора мономера (Bachem AG, Швейцария) в смеси воды с гексафторизопропанолом (1,1,1,3,3,3-Гексафторо-2-пропанол). Модуль Юнга измерялся локально при помощи сканирующего нанотвердомера НаноСкан-4D (ФГБНУ ТИСНУМ, Россия). Количество воды в микротрубках определялось с помощью конфокального микроскопа комбинационного рассеяния Alpha 300AR (WITec GmbH, Германия) по методике, описанной в работе [5]. Уменьшение количества воды в наноканалах производилось путём контролируемого отжига микротрубок. Пьезоэлектрический коэффициент измерялся при помощи сканирующего зондового микроскопа MFP3D (Asylum, США).

Обнаружено, что в исходном состоянии микротрубок ДФА преобладают два характерных значения модуля Юнга: 25 ГПа и 10 ГПа, которые были ассоциированы с заполненными и пустыми трубками соответственно [6]. После последовательного отжига микротрубок при 80°C в течение 3 и 8 часов наблюдалось преобладание малых значений модуля Юнга, что подтверждает наличие корреляции между величиной модулем Юнга и содержанием воды в наноканалах.

Пьезоэлектрический коэффициент d_{15} измерялся для микротрубок в исходном состоянии и после контролируемого отжига. Обнаружено, что отжиг приводит к нелинейному уменьшению d_{15} . Следовательно, содержание воды в наноканалах является одним из факторов, определяющих пьезоэлектрические свойства трубок ДФА.

Исследование выполнено с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых (МК-2294.2017.2) и Правительства Российской Федерации (постановление 211, контракт 02.A03.21.0006).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kholkin A., Amdursky N., Bdikin I., Gazit E., Rosenman G., ACS Nano **4**, 610 (2010).
2. Vasilev S., Zelenovskiy P., Vasileva D. et al., J. Phys. Chem. Solids **93**, 69 (2016).
3. Esin A., Baturin I., Nikitin T. et al., Appl. Phys. Lett. **109**, 142902 (2016).
4. Gan Z., Wu X., Zhu X., Shen J., Angew. Chem. Int. Ed. Engl., vol. 52, 7, 2056, (2013).
5. Wu X., Xiong S., Wang M., Shen J., Chu P. K., J. Phys. Chem. C **116**, 9793 (2012).
6. Zelenovskiy P., Kornev I. et al., Phys. Chem. Chem. Phys. **18**, 29684 (2016).

Влияние окислительных обработок на электрические свойства восстановленных кристаллов LiNbO_3

Яценко А.В., Ягунов С.В., Притуленко А.С.

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, 3952007, Россия (E-mail: lab2@crimea.edu)

Кристаллы ниобата лития (LiNbO_3 , НЛ) широко применяются в устройствах на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и создания электрооптических элементов. НЛ обладает ярко выраженными пирозлектрическими свойствами, что вызывает проблемы в процессе эксплуатации таких устройств при изменении температуры окружающей среды. Для уменьшения влияния пирозэффекта на параметры изделий из LiNbO_3 используется термохимическое восстановление НЛ, которое уменьшает удельного сопротивления кристалла на несколько порядков [1]. Стабильность электрических свойств таких кристаллов ранее не исследовалась, однако имеются данные, что электрическое сопротивление восстановленных кристаллов НЛ значительно увеличивается после прогревов в сухом воздухе при температурах выше 423 К [2].

Для серии кристаллов НЛ, предварительно восстановленных при температуре $T = 873$ К в атмосфере насыщенных паров H_2O , методом импедансной спектроскопии исследовано влияние дополнительных контролируемых прогревов в сухом воздухе на электрические свойства этих образцов. Отжиги проводились при температурах $T_{ox} = 473 \dots 873$ К. Во избежание неконтролируемой оксидизации образцов эксперименты выполнялись при $T = 298 \dots 410$ К.

С ростом T_{ox} в приповерхностных слоях кристалла происходит прогрессирующее разрушение биполяронов ($\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+} - \text{Nb}_{\text{Nb}}^{4+}$), отвечающих за оптическое поглощение и электрическую проводимость восстановленных кристаллов НЛ (рис. 1). Этот процесс сопровождается принципиальными изменениями характера электрической проводимости модифицированных слоев.



Рис. 1. Полярные срезы восстановленных образцов НЛ, прогретых в воздухе при $T_{ox}=550$ (1), 525 (2) и 500°C (3) в течение 1 часа. Размер пластинок – 7×15 мм²

На основании анализа полученной зависимости усредненной энергии активации проводимости $\langle E_a \rangle$ электрически (и оптически) модифицированных приповерхностных слоев от T_{ox} установлено, что при $598 < T_{ox} < 673$ К это значение больше, чем для “as grown” кристаллов НЛ. Увеличение $\langle E_a \rangle$ однозначно указывает на то, что в процессе переноса заряда участвует, по крайней мере, два типа ионов [3], одним из которых, вероятно, являются вакансии кислорода. Обсуждается возможность того, что одновременно с диффузией кислорода из воздуха в восстановленные кристаллы НЛ происходит частичная депротонизация образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bordui P., Jundt D., Standifer E., et al., J. Appl. Phys. **85**, 3766 (1999).
2. Yatsenko A.V., Pritulenko A.S., Yevdokimov S.V., et al., SSP. **200**, 193 (2013).
3. Притуленко А.С., Яценко А.В., Евдокимов С.В. Кристаллография **60**, 293 (2015).

Дисперсионное поведение диэлектрической проницаемости твердых растворов на основе системы ЦТС

Андрюшина И.Н., Андрюшин К.П., Дудкина С.И., Резниченко Л.А.

Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: futur6@mail.ru)

На сегодняшний день одним из современных трендов становится направление, связанное с интеллектуализацией элементной базы, то есть с переходом к конкурентоспособным активным материалам третьего поколения. Этот переход непосредственно связан с решением фундаментальной проблемы сегнетоэлектрического материаловедения – определением закономерностей формирования физических свойств, чему, в определённой мере, и посвящено настоящее исследование. В качестве объектов исследования выступили твёрдые растворы (ТР) на основе системы ЦТС составов: $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3$ (1), $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3\text{+SiO}_2$ (2), отличаются составы соотношением вводимых компонент и добавлением в состав (2) SiO_2 .

На рис. 1. представлены температурные зависимости обратного хода (охлаждения) относительной диэлектрической проницаемости (ϵ/ϵ_0) от частоты измерительного поля (f) ($25 \div 2 \cdot 10^6$) Гц при температурах (300-970) К ТР состава (1) и (2). На врезках представлены зависимости $\epsilon/\epsilon_0(T) | f$ ($25\text{Hz} - 2 \cdot 10^6$). Как видно из рисунка, на всех исследовательских частотах формируются ярко выраженные максимумы ϵ/ϵ_0 , при этом на низких f – они четкие, острые, а по мере увеличения f снижаются и размываются, образуя куполообразные «вершины» зависимостей $\epsilon/\epsilon_0(T) | f$, но не сдвигаются, как это характерно для сегнетоэлектриков (СЭ) – релаксоров. Такое поведение диэлектрической проницаемости свидетельствует о том, что ТР могут быть отнесены к СЭ с размытым фазовым переходом (РФП). Во всех изученных составах наблюдается слабая дисперсия ϵ/ϵ_0 до фазового перехода (ФП) в параэлектрическую фазу (ПЭ) фазу. В момент ФП в ПЭ фазу дисперсия ϵ/ϵ_0 становится сильной и ослабевает в ПЭ области до некоторых температур $\sim 700\text{K}$, после чего становится существенной при низких частотах. Отмечается рост ϵ/ϵ_0 в ПЭ области при температурах из интервала $700 \div 900\text{K}$, постепенно повышающихся по мере увеличения f , и только при $f \approx 10$ кГц и 1 МГц этого роста нет. Стоит отметить следующий факт, введение в состав небольшого количества SiO_2 привело к падению ϵ/ϵ_0 почти в два раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГЗ (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ), СП №3197.2016.3 и с использованием оборудования ЦКП «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИФ ЮФУ.

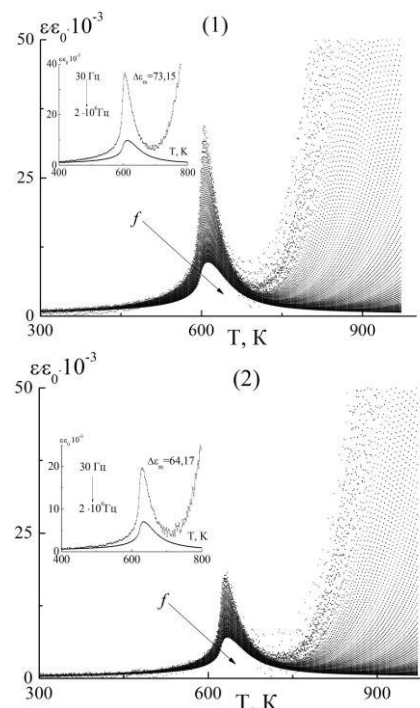


Рис. 1. Зависимости $\epsilon/\epsilon_0(T)$ при разных f измерительного электрического поля ТР (1) и (2). На врезках представлены зависимости $\epsilon(T) | f$ ($25\text{Hz} - 2 \cdot 10^6$).

Взаимодействие поляризации и параметра порядка в релаксоре $\text{Na}_{1/2}\text{V}_{1/2}\text{TiO}_3$

Борисов С.А.¹, Вахрушев С.Б.^{1,2}, Долгаков И.А.²

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26, Россия (E-mail: sergey.borisov@mail.ioffe.ru)

²Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, Россия.

В предлагаемой работе приводятся результаты исследования температурной эволюции интенсивности сверхструктурных отражений монокристалла сегнетоэлектрика-релаксора $\text{Na}_{1/2}\text{V}_{1/2}\text{TiO}_3$ (NBT), измеренных методом рассеяния тепловых нейтронов. А также его диэлектрических спектров в области сосуществования тетрагональной и ромбоэдрической фаз 300 - 1000К в диапазоне измерительных частот 0,1 Гц – 10 МГц в режиме нагрева и охлаждения.

В последние годы был опубликован ряд работ, посвященных связи структуры и диэлектрического отклика в этом материале [1-5]. Было высказано предположение о полярном характере тетрагональной фазы [1].

На рис. 1 приведена температурная зависимость силы диэлектрического осциллятора в области температур, соответствующих фазовому переходу в тетрагональную фазу. Хорошо виден размытый скачок в области 630 К. Этот скачок возникает в режиме нагрева одновременно с появлением сверхструктурных отражений типа $(h+1/2, k+1/2, l)$ (M-сверхструктура). Эти отражения связаны с параллельными в соседних слоях разворотами кислородных октаэдров вдоль оси Z. Соответствующий параметр порядка может быть связан с поляризацией только биквадратичным образом. Таким образом, если в M-сверхструктуру не дают вклада катионные смещения, то мы не можем предполагать возникновения несобственного сегнетоэлектричества.

Положение максимума на кривой $\epsilon'(T)$ совпадает с температурой, при которой начинается уменьшение интенсивности сверхструктурных отражений M-типа и возникают отражения R-типа в экспериментах по рассеянию нейтронов. Было сделано предположение о том, что максимум диэлектрической проницаемости обусловлен взаимодействием поляризации и параметра порядка R-типа.

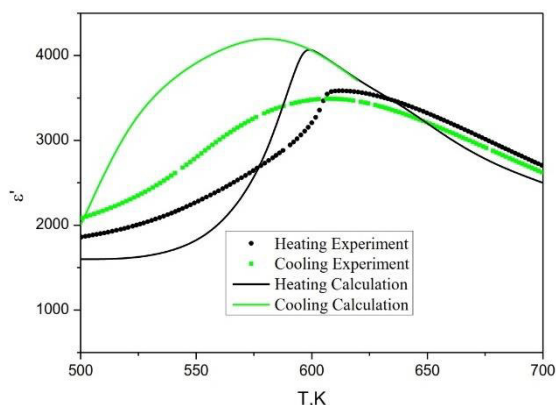


Рис. 1. Температурная зависимость ϵ' в области фазового перехода в тетрагональную фазу.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Kreisel et al., J. Phys.: Cond Mat. **12**, 3267 (2014).
2. S. Gorfman et al., J. Appl. Cryst. **48**, 1543-1550 (2015).
3. S. Gorfman et al., J. Appl. Cryst. **45**, 444-452 (2015).
4. M. Matsuura et al., PRB **87**, 06419 (2013).
5. W. Ge et al., PRB **88**, 174115 (2013).

Зависимость диэлектрического отклика монокристаллов $PbSc_{1/2}Ta_{1/2}O_3$ от условий роста и степени упорядочения

Полушина А.Д.^{1,2}, Смирнова Т.А.¹, Залесский В.Г.¹, Шаплыгина Т.А.¹,
Зайцева Н.Н.¹, Лушников С.Г.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021,
Россия (E-mail: nsh@mail.ioffe.ru)

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И.
Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ "ЛЭТИ"), Санкт-Петербург, 197376, Россия

Сегнетоэлектрики со структурой перовскита $PbV'_{1/2}V''_{1/2}O_3$ ($V' = Sc^{3+}$, $V'' = Nb^{5+}$, Ta^{5+}) обладают гигантскими значениями пьезоэлектрических коэффициентов [1,2]. Природа возникновения аномальных пьезоэлектрических свойств до конца не понятна и является предметом активных исследований. Характерной особенностью динамики решетки в семействе $PbV'_{1/2}V''_{1/2}O_3$ является зависимость последовательности фазовых переходов от степени упорядочения катионов V' и V'' . Соединения $PbSc_{1/2}Ta_{1/2}O_3$ (PST) являются одним из модельных объектов при исследовании динамики решетки в рассматриваемой группе перовскитов. Особый интерес к PST связан с тем, что с помощью температурного отжига динамика кристаллической решетки меняется от релаксорного сегнетоэлектрического поведения в разупорядоченном состоянии к классическому сегнетоэлектрическому в упорядоченном [1,2]. В настоящей работе исследовалось влияние условий роста монокристаллов PST на степень упорядочения и на диэлектрические свойства.

В работе рассматривались кристаллы PST, выращенных при различных условиях (исходные компоненты, скорость охлаждения расплава и др.). Степень упорядочения оценивалось по измеренным на рентгеновском дифрактометре интенсивностям дифракционных рефлексов $I(hkl)$ для соединений с разной степенью упорядочения по отношению к теоретическим рефлексам для полностью упорядоченной структуры. В ходе роста получены монокристаллы PST с разной степенью упорядочения, $S = 0.29, 0.40$ и 0.84 . На приготовленных образцах проводились исследования температурных зависимостей (от 77 до 450К) действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей диэлектрической проницаемости в интервале частот 10 Hz - 100 kHz и проводимости. Показано, что аномалия ϵ' в виде широкого и частотно-зависимого максимума в районе размытого фазового перехода смещается в область более высоких температур, и ее величина значительно уменьшается по мере понижения степени упорядочения. Результаты исследований обсуждаются в рамках современных представлений о динамике кристаллической решетки при структурных фазовых переходах.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 14-12-00257.

ЛИТЕРАТУРА

1. Woodward P.M. and K. Z. Baba-Kishi K.Z. Appl. Cryst. **35**, 233 (2002).
2. Setter N., Cross L.E. J. Appl. Phys. **51**, 4356 (1980).

Диэлектрический отклик гетерофазного твердого раствора (Ca-Pb)TiO₃

**Командин Г.А.¹, Породинков О.Е.¹, Спектор И.Е.¹, Буш А.А.²,
Каменцев К.Е.², Серегин Д.С.², Исакова Л.Д.³**

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия
(E-mail: gakomandin@mail.ru)

²Московский технологический университет, МИРЭА, Москва, 119454, Россия

³Научный центр волоконной оптики РАН, 119991 Москва, Россия

Применение гетерофазных систем при создании элементной базы электроники позволяет целенаправленно управлять критическими диэлектрическими параметрами. К ним в первую очередь относятся величина диэлектрической проницаемости, напряжение пробоя и динамическая проводимость. Твердые растворы (Ca-Pb)TiO₃ в зависимости от концентрации Ca – Pb обладают сегнетоэлектрическими или релаксорными свойствами, что позволяет управлять их диэлектрическими параметрами. В керамике СРТ в области морфотропной границы происходит разделение на две устойчивые фазы – сегнетоэлектрическую тетрагональную Ca_{0,38}Pb_{0,62}TiO₃ и неполярную орторомбическую Ca_{0,44}Pb_{0,56}TiO₃.

На рис. 1 представлены широкодиапазонные спектры гетерофазной керамики (Ca-Pb)TiO₃. Доминирующий вклад электродипольных колебаний кристаллической решетки в диэлектрическую проницаемость формируется низкочастотной модой. Такое поведение отклика характерно для сегнетоэлектриков, поэтому можно полагать, что за эту часть проницаемости отвечает сегнетоэлектрическая фаза. На низких частотах вклад увеличивается еще в два раза. Диэлектрические потери при этом не зависят от частоты. Подобное поведение (Nearly Constant Losses – NCL) характерно для решеточной нестабильности релаксационного вида, когда энергия движения ионов ниже энергии активации прыжковой проводимости [1, 2]. На наш взгляд, особенности полученных спектров можно объяснить динамикой ионов в многоминимумном потенциале с учетом вклада переполаризации кристаллитов сегнетоэлектрической фазы [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований: гранты № 16-02-00223 и № 15-02-04647; Министерства образования и науки РФ (проект №734 Гос. задания).

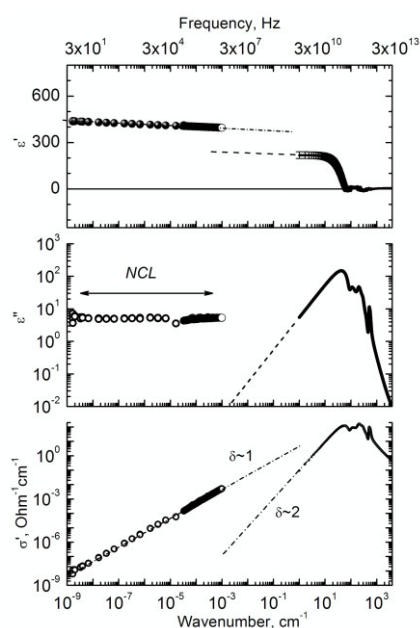


Рис. 1. Широкодиапазонные спектры диэлектрического отклика гетерофазной керамики (Ca-Pb)TiO₃. NCL – область постоянных потерь

ЛИТЕРАТУРА

1. K. L. Ngai, A.K. Jonscher, C.T. White. Nature **227**, 185 (1979).
2. C. León, A. Rivera, A. Várez, J. Sanz et.al. Phys. Rev. Lett. **86**, 1279 (2001).
3. J. Petzelt et.al. Phys. Rev. B. **64**, 184111 (2001)

Фотостимулированные токи в монокристаллах магнониобата и магнониобата-титаната свинца

Мигачев С.А.¹, Мамин Р. Ф.¹, Раевский И.П.², Раевская С.И.²

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН, Казань, 420029, Россия (E-mail: smigach@kfti.knc.ru)

²Южный федеральный университет, Ростов на Дону, 344090, Россия

Сегнетоэлектрики с размытыми фазовыми переходами (релаксоры), к классу которых относятся и исследуемые в данной работе объекты, представляют значительный интерес, как с точки зрения изучения физики происходящих в них процессов, так и с точки зрения их практических применений. Мы исследовали спектральные зависимости фотостимулированного тока для кристаллов номинально чистого магнониобата свинца (PMN) и магнониобата-титаната свинца (PMN+6%PT) при комнатных температурах. Все измерения проводились на образцах в форме параллелепипедов размерами 6.2x4.5x0.65 мм³ (PMN) и 1.0x5.6x4.0 мм³ для (PMN+6%PT). Для регистрации фотостимулированного тока, на поверхностях размерами 4.5x6.2 мм² ((PMN) и 5.6x4.0 мм² (PMN+6%PT) наносились электропроводящие электроды из серебряной пасты. Световое облучение фокусировалось внутрь исследуемых образцов системой линз через оптически обработанные поверхности размерами 0.65x6.2 мм² или 1.0x5.6 мм² (плоскость(100)). Условия и детали методики эксперимента представлены в работе [1].

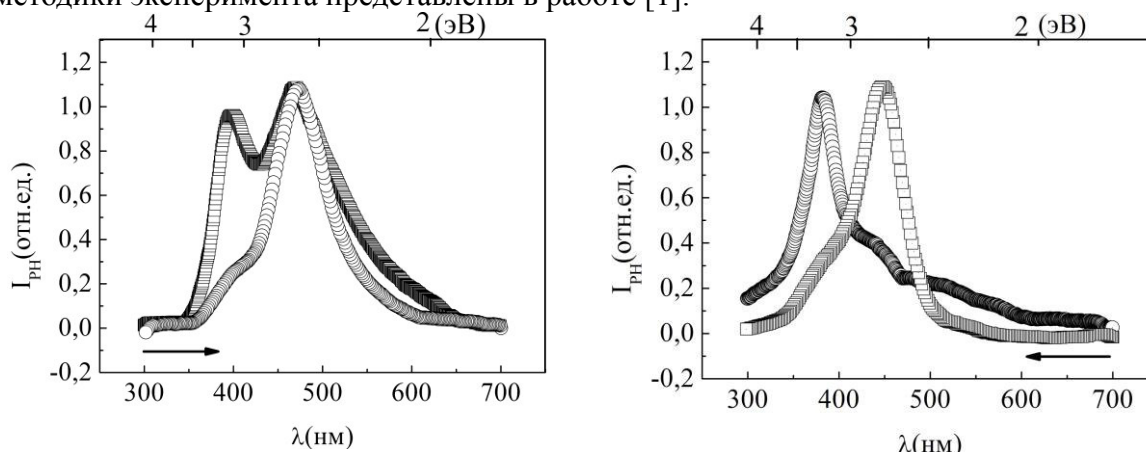


Рис. 1

На рис. 1. представлены спектральные зависимости фотоиндуцированного тока для образцов (PMN) (кружки) и PMN+6%PT (квадратные точки) при приложенном электрическом поле напряженностью $E=100$ В/см. Стрелками указано направление перестройки длины волны λ светового облучения. В результате длительного (30 мин) облучения светом ($\lambda=400$ нм, $E=1000$ В/см) после выключения электрического поля при последующей записи спектральной зависимости ($E=0$ В/см) появляется участок тока (350-600 нм) обратного направления, что соответствует разрядке электретных состояний. Мы также исследовали влияние интенсивного светового облучения (470 нм) на диэлектрические свойства образцов и возникновение фотовольтаического напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамин Р.Ф., Мигачев С.А., Садыков М.Ф., Юсупов Р.В. ФТТ **57**, в.3, 519(2015).

Влияние структурных дефектов на диэлектрические свойства кристаллов $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ и $0.87\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3 - 0.13\text{BaTiO}_3$

Крузина Т.В.¹, Сидак В.М.¹, Трубицын М.П.¹, Попов С.А.¹,
Тулюк А.Ю.¹, Суханич Я.²

¹Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепр, 49010, Украина
(E-mail: vsidak@3g.ua)

²Institute of Physics, Pedagogical University, Krakow, 30-084, Poland

Натрий-висмутовый титанат $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ (NBT) и твердые растворы на его основе $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-BaTiO}_3$ (NBT-BT) являются одними из наиболее перспективных материалов для использования в электромеханических преобразователях [1]. Ранее в [2] было обнаружено влияние собственных дефектов на электрические свойства NBT. В данной работе изучается влияния термообработки на диэлектрические свойства кристаллов NBT и 0.87NBT-0.13BT .

Измерение диэлектрических свойств осуществлялось с помощью моста переменного тока Р5083 в частотном диапазоне $0,5 \div 100$ кГц и в интервале температур 300-800 К. Исходные образцы подвергались отжигу на воздухе при температуре 1100 К (1 ч), а затем в вакууме при 1100К (2 ч). Измерение зависимостей $\varepsilon(f,T)$ проводилось для исходных образцов и после каждого цикла термообработки. Зависимости $\varepsilon(T)$, полученные для $f=1$ кГц, приведены на рис. 1.

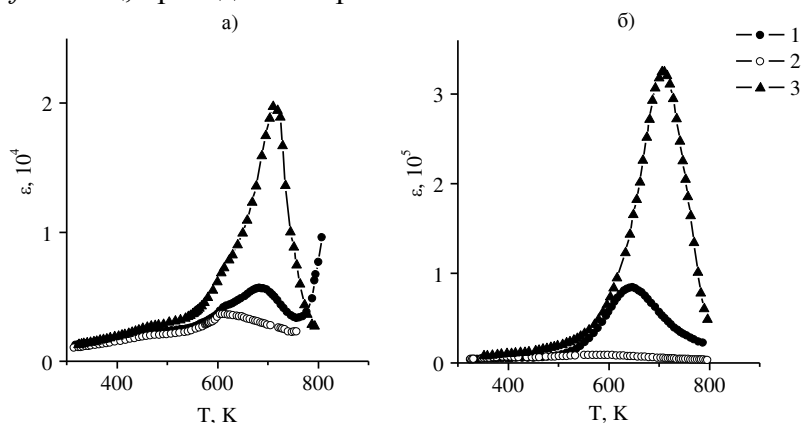


Рис. 1 Зависимости $\varepsilon(T)$ кристаллов NBT (а) и 0.87NBT-0.13BT (б): 1 - исходный образец; 2 - образец, отожженный в воздухе ($T=1100$ К); 3 - образец, полученный последующим отжигом в вакууме ($T=1100$ К). $f=1$ кГц.

Из данных на рис.1 видно, что диэлектрические свойства исходного образца характеризуются наличием низкочастотного релаксационного максимума ε вблизи 670 К, который практически исчезает после отжига в воздухе (кривые 2). Отжиг в вакууме приводит к частичному восстановлению пика ε вблизи 670К (кривые 3). Предполагается, что релаксационный максимум ε обусловлен наличием дипольных комплексов, которые формируются при участии кислородных вакансий.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Nahm, S. Priya eds. Lead-Free Piezoelectrics. New York: Springer (2012).
2. T.V. Kruzina, V.M. Sidak, M.P. Trubitsyn et al. Ferroelectrics **462**, 140 (2014).

Широкополосный диэлектрический отклик твердого раствора $\text{SrTiO}_3\text{-SrMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$

Спектор И.Е.¹, Командин Г.А.¹, Породинков О.Е.¹, Гончаров Ю.Г.¹

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН Москва, 119991, Россия
(E-mail: spektor@ran.gpi.ru)

Твердые растворы структурного семейства перовскита ABO_3 являются широко используемой базой для создания материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. Простота замещения ионов в А и В позициях позволяет контролировать структурные и электродинамические характеристики материала.

Диэлектрический отклик твердого раствора $\text{SrTiO}_3\text{-SrMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (STO-SMNO) с 3% содержанием SMNO демонстрирует мощную, зависящую от температуры, дипольную релаксацию на низких частотах [1]. Эта релаксация определяет высокие значения статической диэлектрической проницаемости при понижении температуры (рис. 1).

Данные ТГц-ИК спектроскопии показывают температурную эволюцию низкочастотной мягкой моды, характерную для потенциального перехода в сегнетоэлектрическую фазу.

На рис. 2 представлены температурные зависимости обратной величины вклада диэлектрической проницаемости и квадрата частоты мягкой моды. Эти величины отложены на правой оси. По экстраполяции их к нулю можно оценить температуру ожидаемого фазового перехода T_c . Анализ температурной зависимости параметров мягкой моды в твердом растворе STO-SMNO показал, что температура перехода смещена в отрицательную область. Это указывает на стабилизацию парафазы при легировании перовскита STO небольшим количеством SMNO.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований: грант № 16-02-00223.

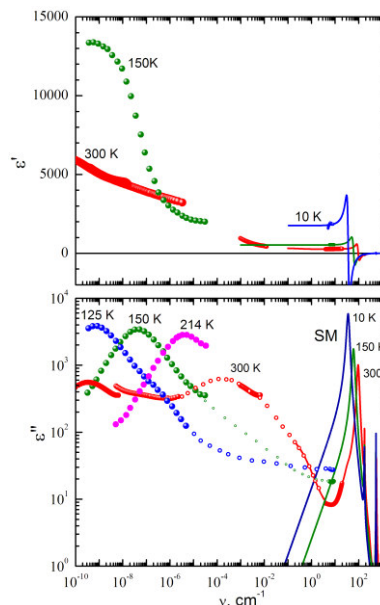


Рис. 1. Широкополосные спектры диэлектрической проницаемости твердого раствора $\text{SrTiO}_3\text{-SrMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$

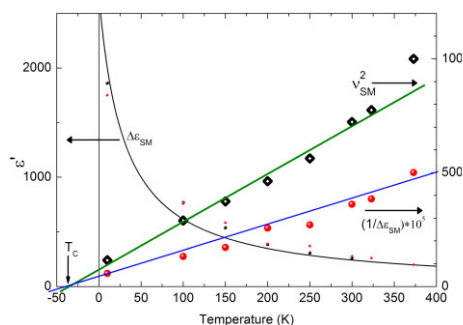


Рис. 2. Температурная эволюция параметров мягкой моды $\text{SrTiO}_3\text{-SrMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.V. Lemanov, A.V. Sotnikov E.P. Smirnova, M. Weihnacht. ФТТ **44**, 1948 (2002).

Феноменологическая теория одноосного релаксора

Широков В.Б.^{1,2}, Павленко А.В.^{1,2}, Юзюк Ю.И.²

¹Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Россия

²Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

(E-mail: shirokov-vb@rambler.ru)

Рассмотрен термодинамический потенциал Ландау одноосного релаксора, связанный с двумя неэквивалентными полярными подрешетками. Два разных, симметрично эквивалентных параметра порядка, связанные с этими подрешетками, приводят к появлению линейной связи между этими параметрами порядка.

Термодинамический потенциал четвертой степени

$$\Phi = a_1 P^2 + a_2 \xi^2 + a_{12} P \xi + a_{11} P^4 + a_{22} \xi^4 + c_{12} P^2 \xi^2 + c_{122} P \xi^3 - PE \quad (1)$$

использован для количественного описания фазовых переходов в одноосном релаксоре Ba_{0.5}Sr_{0.5}Nb₂O₆ (BSN50) [1]. Найдены коэффициенты потенциала (1), с которыми адекватно описываются полярizationные петли BSN50 при различных температурах. Температурой истинного фазового перехода является температура Барнса, при которой появляется антрисегнетоэлектрический параметра порядка ξ . В силу линейной связи между параметрами порядка, одновременно появляется и поляризация P , которая, однако, вблизи фазового перехода весьма мала (рис. 1). Широкий максимум диэлектрической проницаемости определяется сильным взаимодействием поляризации с антрисегнетоэлектрический параметром порядка и не является фазовым переходом. В точке фазового перехода обращается в нуль антрисегнетоэлектрическая мягкая мода. Сегнетоэлектрическая мягкая мода в точке фазового перехода имеет лишь едва заметный излом (рис. 2).

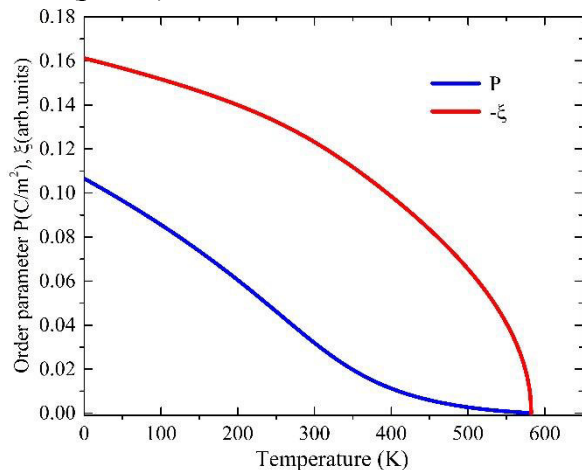


Рис. 1. Температурная зависимость параметров порядка релаксора BSN50

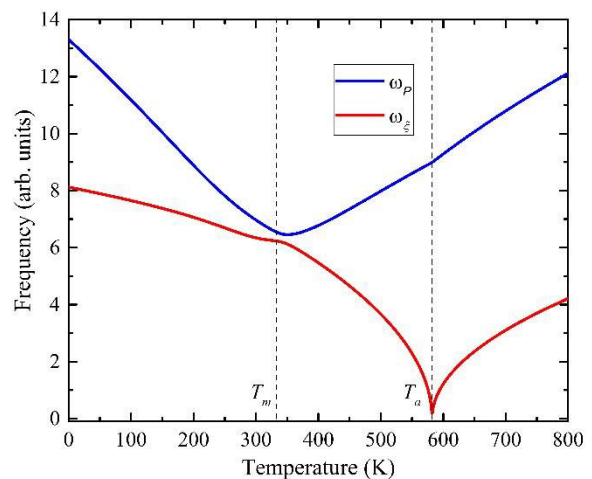


Рис. 2. Температурная зависимость мягких мод релаксора BSN50

Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания на 2017 г. № 007-01114-16 ПР (номер проекта 0256-2014-0002).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shirokov V. B., Pavlenko A.V., and Yuzyuk Yu.I. J. Phys.: Condens. Matter **28**, 395902 (2016).

Фазовая диаграмма состояний четырехкомпонентной системы $0.98(x\text{PbTiO}_3 - y\text{PbZrO}_3 - z\text{PbNb}_{2/3}\text{Mg}_{1/3}\text{O}_3) - 0.02\text{PbGeO}_3$ и особенности дисперсионных характеристик ее твердых растворов

Юрасов Ю.И.^{1,2}, Шилкина Л.А.¹, Резниченко Л.А.¹

¹Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета НИИ физики ЮФУ, Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: yui@sfedu.ru)

²Южный научный центр Российской академии наук ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону, 344006, Россия (E-mail: yucomp@ya.ru)

Система представляет интерес с точки зрения расширения возможностей применения сегнетоэлектрических материалов, базирующихся на твердых растворах (ТР) ЦТС ($\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$), в микроэлектронике, пьезотехнике. На рис.1 показаны тетраэдр составов и треугольник Гиббса с выбранными исследовательскими разрезами. Построены фазовые

диаграммы всех разрезов системы, характеризующиеся ромбоэдрически-тетрагональным переходом. Во всех объектах выявлено возникновение в однофазных полях нескольких изосимметричных состояний и областей их сосуществования, а в морфотопных областях – нескольких промежуточных, дополнительных (кроме основных Рэ и Т) фаз, последовательно образующихся и формирующих сложные области концентрационных симметрийных переходов с широким разнообразием фазового наполнения, сопровождающихся экстремальным поведением макроскопических свойств. На фазовой x -Т диаграмме системы обнаружены ряд областей с качественно разным поведением диэлектрических характеристик, коррелирующих с последовательными превращениями в системе. Показано, что в исследуемой системе по сравнению с базовой системой ЦТС упрощение фазообразования за счет взаимовлияния различных типов дефектов структуры (точечных, протяженных, каркасных - блочных) приводит к меньшей «изрезанности» концентрационных зависимостей макроскопических свойств ТР; имеет место значительно меньшая дисперсия относительной диэлектрической проницаемости ϵ/ϵ_0 ТР; выявленные ТР с различным характером проявления сегнетоэлектрических (СЭ) свойств (классические СЭ, релаксоры, СЭ с размытым фазовым переходом) занимают меньшие по протяженности поля. Показана возможность практического применения некоторых из изученных ТР в различных отраслях электронной техники (дефектоскопии, датчиковой аппаратуре, низкочастотном приборостроении); проведено сравнение работы датчиковой аппаратуры, выполненной на основе ниобатов щелочных металлов и рассмотренных ТР.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики ЮФУ.

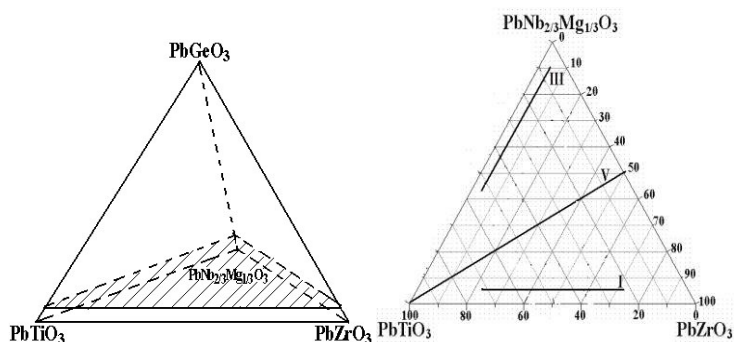


Рис. 1. Тетраэдр составов и треугольник Гиббса системы $0.98(x\text{PbTiO}_3 - y\text{PbZrO}_3 - z\text{PbNb}_{2/3}\text{Mg}_{1/3}\text{O}_3) - 0.02\text{PbGeO}_3$.

Изучение магнитных свойств сегнетокерамики $\text{PbMn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$

**Абдулвахидов Б.К.¹, Садыков С.А.¹, Амиров А.А.², Каллаев С.Н.²,
Омаров З.М.², Абдулвахидов К.Г.³, Сирота М.А.³, Дмитренко И.П.³,
Русалев Ю.В.³**

¹Дагестанский Государственный Университет, 367008, Россия (E-mail: babdulvakhidov@mail.ru)

²Институт Физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН, 367003, Россия

³Южный Федеральный Университет, 344006, Россия

$\text{PbMn}_{1/2}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ является классическим перовскитом с антиферромагнитным упорядочением, который имеет большой потенциал применения на практике, в частности в многослойных тонких пленках. Несмотря на широкие возможности применения этого материала, в литературе экспериментальные данные по нему практически не встречаются.

В рамках данной работы были проведены измерения магнитоэлектрического (МЭ) эффекта и магнитоемкости для мультиферроика $\text{PbMn}_{1/2}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$. Амплитуда переменного модулирующего поля составляла около 10 Э. Образец для магнитоэлектрических измерений представлял собой тонкий диск, линейные размеры которого на порядок меньше его толщины.

При комнатной температуре $\text{PbMn}_{1/2}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ не имеет магнитного упорядочения и поэтому магнитоэлектрического упорядочения в при этой температуре не было обнаружено. При $T=77\text{ K}$ для $\text{PbMn}_{1/2}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ наблюдается линейная зависимость МЭ коэффициента и магнитоемкости, что свидетельствует о взаимодействии магнитной и электрической подсистем образца (см. рис. 1). Так как $\text{PbMn}_{1/2}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ относится к смешанным перовскитам с антиферромагнитным упорядочением, которое является более слабым типом магнитного упорядочения, чем ферромагнитное, а для соединений такого типа экспериментально чаще наблюдается линейный МЭ эффект, что и было обнаружено в настоящей работе.

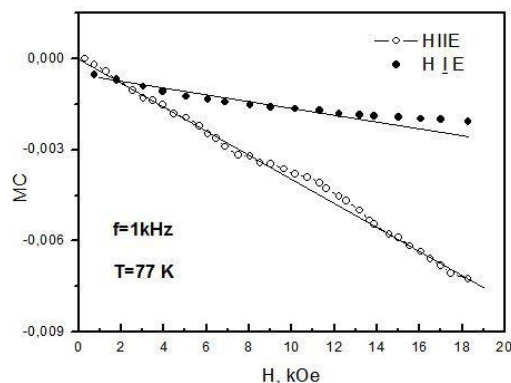


Рис. 1. Магнитопольные зависимости магнитоемкости (магнитодизлектрического эффекта) образца $\text{PbMn}_{1/2}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ при $T=77\text{ K}$

Влияние модифицирования на диэлектрические макроотклики твердых растворов системы $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{BaTiO}_3$

Болдырев Н.А.¹, Глазунова Е.В.¹, Резниченко Л.А.¹

¹Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: nboldyrev@sfedu.ru)

В настоящее время особое внимание уделяется поиску и созданию новых композиционных материалов различного назначения. Мультиферроики (вещества, сочетающие электрическое и магнитное упорядочения в широком диапазоне температур) считаются наиболее перспективными объектами в этой области. Феррит висмута, BiFeO_3 , (BFO) – один из самых изученных представителей данного класса материалов. Однако, широкому его применению препятствует критическая зависимость его фазового состава и характеристик от условий получения, высокая электропроводность и, как следствие, невозможность создания поляризованного состояния. Эти недостатки можно устранить путем создания твердых растворов (ТР) на основе BFO, а также их модифицированием. Ранее нами [1] уже изучались свойства ТР системы $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{BaTiO}_3$. Данная работа посвящена исследованию влияния модифицирования на его диэлектрические характеристики. Объектами исследования явились полученные по обычной керамической технологии ТР системы $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{BaTiO}_3$ ($x=0.25, 0.30, 0.35$) чистые и модифицированные сверхстехиометрически 0.5 % оксида марганца (III) Mn_2O_3 . На рис. 1 показаны температурные зависимости действительной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ от температуры на частоте 1 МГц. Как видно из рисунка, введение модификатора сильно уменьшило значения $\text{tg}\delta$ и повлияло на положение точки Кюри на температурной оси. В работе обсуждается связь наблюдаемых явлений с фазовым составом и эффектами катионного замещения, имеющими место в модифицированных образцах.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования ЦКП «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики ЮФУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдырев Н.А., Павленко А.В., Шилкина Л.А., Назаренко А.В., Резниченко Л.А., Миллер А.И., Изв. РАН Сер. Физ. 80, 1469 (2016)

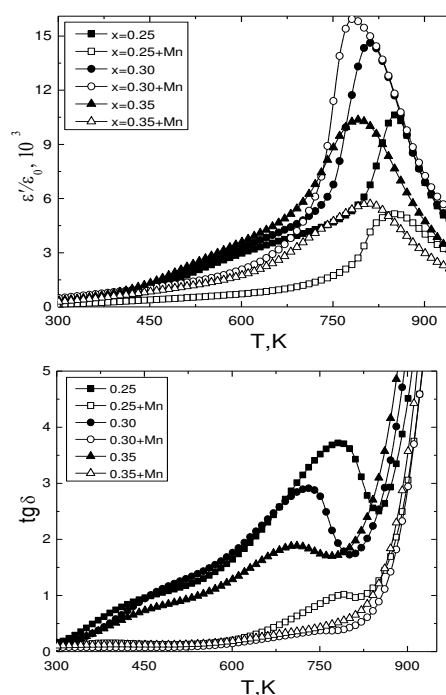


Рис. 1. Температурные зависимости ϵ'/ϵ_0 и $\text{tg}\delta$ исследуемых ТР на частоте 1 МГц.

Теплопроводность и теплоемкость мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{FeO}_3$

**Гаджиев Г.Г.¹, Омаров З.М.¹, Бакмаев А.Г.¹, Каллаев С.Н.¹,
Амирова А.А.¹, Абдуллаев Х.Х.¹, Резниченко Л.А.², Хасбулатов С.В.²**

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Дагестанского научного центра Российской Академии наук, Махачкала, ул. М.Ярагского, 94, Россия (E-mail: gadjiev@mail.ru)

²Научно-исследовательский института физики Южного федерального университета Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194, Россия

Исследована температурная зависимость теплопроводности, теплоемкости твердых растворов (ТР) $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{FeO}_3$ ($x=0.05; 0.10; 0.15; 0.20$) в интервале температур 300-800К. Образцы были получены по обычной керамической технологии путем твердофазного синтеза с последующим отжигом при температуре 930°C, после чего прессовались для получения нужных размеров и плотности. Плотность измерялась методом гидростатического взвешивания. Полученные твердые растворы обладали 88-92% относительной плотности, что свидетельствует о достаточно хорошем качестве образцов. Определялся фазовый состав, параметры ячейки, степень совершенства кристаллической структуры при различных температурах.

Теплопроводность измерялась как абсолютным компенсационным методом в стационарном режиме [1], так и на установке LFA-457 MicroFlash фирмы NETZSCH методом лазерной вспышки.

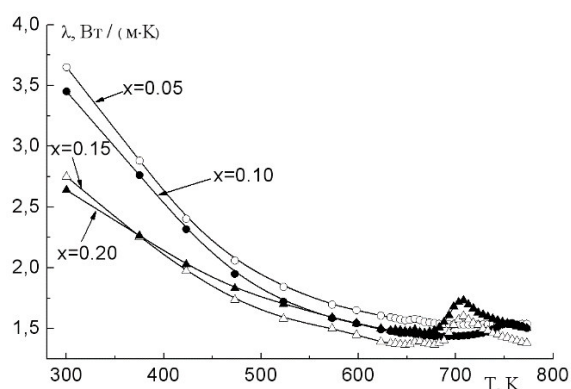


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{FeO}_3$ с $x=0.05-0.20$

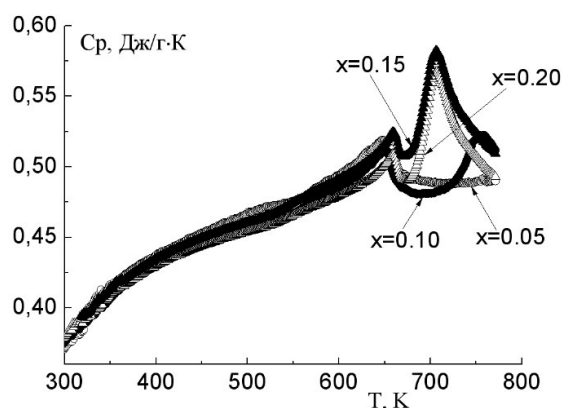


Рис. 2. Температурная зависимость теплоемкости $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{FeO}_3$ с $x=0.05-0.20$

Как видно из рис. 1 теплопроводность исследованных образцов в области $T < T_N$ (антиферромагнитного перехода) с повышением температуры и концентрации уменьшается ($\lambda \approx CT^{-0.90}$). Обнаружено, что незначительное замещение висмута празеодимом приводит к заметному смещению температуры антиферромагнитного фазового перехода (рис. 2). На температурных зависимостях теплоемкости для составов с $x = 0.10, 0.15$ и 0.20 обнаружены дополнительные аномалии, характерные для фазовых переходов, при $T \sim 755$ и $T \sim 710$ К, соответственно. Результаты исследований обсуждаются совместно с данными структурных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магомедов Я.Б., Гаджиев Г.Г. ТВТ **1**, 185 (1990).

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости фтороперовскитов марганца AMnF_3 ($A = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$)

Дубровин Р.М., Кижяев С.А., Сырников П.П., Писарев Р.В.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН Санкт-Петербург, 194021, Россия (E-mail: dubrovin@mail.ioffe.ru)

Фтороперовскиты обладают большим разнообразием интересных структурных, магнитных, оптических, акустических и других свойств, но до настоящего времени систематические исследования их диэлектрических свойств, за редким исключением, не проводились. Наше исследование направлено на изучение роли структурных и магнитных фазовых переходов на температурную зависимость диэлектрической проницаемости $\epsilon(T)$ в антиферромагнитных фтороперовскитах AMnF_3 ($A = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$). Магнитные свойства этой группы определяются ионами Mn^{2+} ($3d^5$, $S=5/2$). KMnF_3 (толеранс-фактор $t = 0.91$) является кубическим при комнатной температуре, при $T_C = 187$ К он испытывает структурный переход в тетрагональную, а при $T_{N1} = 87$ К и $T_{N2} = 82$ К в нем происходят магнитные фазовые переходы. RbMnF_3 ($t = 0.96$) является кубическим во всем температурном интервале и антиферромагнетиком ниже $T_N = 83$ К. Гексагональный CsMnF_3 ($t = 1.03$) является антиферромагнетиком ниже $T_N = 53.5$ К.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости в KMnF_3 ранее была описана в [1, 2, 3]. Мы расширили температурный и частотный диапазон и провели исследования от 4.2 до 350 К в интервале от 10 кГц до 1 МГц. При понижении температуры от 350 К в KMnF_3 значение ϵ растет, а при температуре T_C , наблюдается аномалия, заключающаяся в резком падении значений диэлектрической проницаемости. При температурах T_{N1} и T_{N2} на зависимости $\epsilon(T)$ наблюдаются аномалии, заключающиеся в скачкообразном увеличении значений диэлектрической проницаемости.

На Рис. 1 показана температурная зависимость $\epsilon(T)$ в RbMnF_3 . При понижении температуры от 350 до 280 К значения диэлектрической проницаемости уменьшаются, что является типичным для ионных кристаллов. Однако при дальнейшем понижении температуры наблюдается рост ϵ вплоть до температуры Нееля. Мы связываем этот рост со внутренней структурной неустойчивостью кубических фтороперовскитов. При T_N на зависимости $\epsilon(T)$ наблюдается резкое уменьшение диэлектрической проницаемости, которое, по нашему мнению, связано с антиферромагнитным вкладом. Такое поведение ϵ при фазовом переходе ранее наблюдалось в других фторидах (например, BaMnF_4 , BaNiF_4). При дальнейшем понижении температуры наблюдается еще одна зависящая от частоты аномалия, заключающаяся в падении значений диэлектрической проницаемости в интервале от $T = 40$ К при 1 МГц до 20 К при 10 кГц. Мы предполагаем, что данная аномалия имеет магнитную природу и связана с движением антиферромагнитных доменных стенок в образце.

Работа выполнялась при поддержке проекта РФФИ №16-12-10456.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kizhaev S. A., Smolenskii G. A., and Tagantsev A. K., JETP Lett. **43** (9), 572 (1986).
2. Rittenmyer K., Bhalla A. S., and Cross L. E., Ferroelectrics Lett. **9** (6), 161 (1989).
Кижяев С. А., Маркова Л. А., ФТТ **53** (9), 1754 (2011).

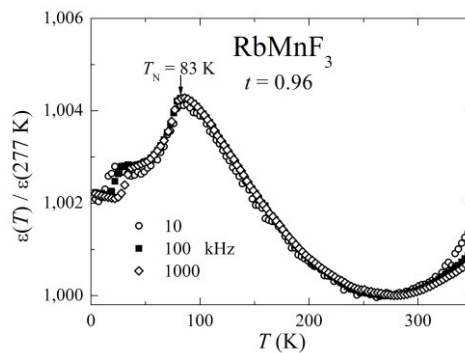


Рис. 1. Зависимость $\epsilon(T)$ в RbMnF_3

Магнитодиэлектрика гетерогенных материалов на основе манганитов

**Кабилов Ю.В.¹, Гавриляченко В.Г.¹, Богатин А.С.¹, Медведев Б.С.¹,
Гаврилова Т.П.², Еремина Р.М.², Лядов Н.М.²**

¹Южный федеральный университет, физический факультет, 344090, г. Ростов-на-Дону, Зорге 5, Россия (E-mail: salv62@mail.ru)

²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН, Казань, 420029, Россия

Влияние магнитного поля на диэлектрическую проницаемость однофазных оксидов и твердых растворов обычно проявляется в сильных полях и при низких температурах, что осложняет практическое использование магнитодиэлектрического эффекта (МД) [1, 2]. В работе [3] показана возможность существования несобственного МД в гетерогенных материалах при наличии магниторезистивности. Механизм проявления МД в таких материалах обусловлен поляризацией Максвелла-Вагнера и зависимостью сопротивления прослойки между кристаллитами от напряженности магнитного поля. При наличии отрицательной магниторезистивности в материалах согласно идее автора [3] может иметь место положительный магнитодиэлектрический эффект. В нашей работе изучены магнитные свойства композита 80%(La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃)/20%GeO₂ и его магнитодиэлектрический эффект. Отметим, что удельное сопротивление образцов составляет примерно 0.1 Ohm·m. Технология приготовления и магниторезистивные свойства исследуемых композитов описаны в работе [4]. Диэлектрические исследования образцов композита 80%(La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃)/20%GeO₂ проведены нами с помощью комплекса NovocontrolALPHA и измерителя иммитанса E7-20. Приготовленная керамика тестировалась на дифрактометре ARL-X'TRA с помощью излучения Cu K α 1.5406 Å. Микроструктура поверхности образцов исследовалась с помощью электронного микроскопа EVO SOXVP с возможностью микроанализа (Carl Zeiss). Во всем используемом нами диапазоне частот измерительного поля (5 kHz – 1MHz) импеданс образцов имеет индуктивный характер. Дисперсия действительной части диэлектрической проницаемости является плазмоподобной и описывается моделью Друде:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_{\tau}^2},$$

где ω – угловая частота измерительного электромагнитного поля, ω_p – угловая плазменная частота, $\varepsilon'(\omega)$ – частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости, ε_{∞} – высокочастотная диэлектрическая проницаемость, ω_{τ} – параметр затухания. В магнитном поле 15 кОе в керамических образцах проявляется магнитодиэлектрический эффект с коэффициентом, достигающим 23 %. Можно предположить, что МД свойства обусловлены изменением концентрации спин-поляризованных носителей заряда, преодолевающих магнитные туннельные контакты при возрастании магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khomskii D. Physics. **2**, 20 (2009).
2. Goto T., T. Kimura, G. Lawes et al. Phys. Rev. Lett. **92**, 257201-1 (2004).
3. Catalan G. Appl.Phys.Lett. **88**. 102902 (2006).
4. Кабилов Ю.В., В.Г. Гавриляченко, А.С. и др. Письма в ЖТФ. 42, В. 6, 1 (2016).

Толеранс-фактор для гексагональных структур $RMnO_3$

Рудская А.Г., Чаговец С.В., Куприянов М.Ф.

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344090, Россия,
(E-mail: arudskaya@yandex.ru)*

Для характеристики наблюдаемых изменений структуры гексагональных фаз $YMnO_3$ мы вводим относительный толеранс-фактор t_x/t_z , в котором t_x и t_z – толеранс-факторы вдоль осей x и z гексагональных структур, выраженные через радиусы ионов типа А и В (r_A, r_B): $t_x = \frac{2(2r_{Mn} + r_O)}{\sqrt{3}(r_Y + r_O)}$; $t_z = \frac{r_{Mn} + r_O + \Delta}{r_Y + r_O}$. Легко видеть, что отношение t_x/t_z

зависит только от ионных радиусов кислорода (r_O) и марганца (r_{Mn}): $\frac{t_x}{t_z} = \frac{2(2r_{Mn} + r_O)}{\sqrt{3}(r_{Mn} + r_O + \Delta)}$

, и от величины $\Delta = \frac{c_H}{4} - (r_{Mn} + r_O)$, которая зависит от параметра c_H и от r_O и r_{Mn} .

Величина Δ представляет собой относительное расстояние от плоскостей ионов типа R до ближайших кислородов вдоль оси z . Вводя две компоненты толеранс-фактора t_x и t_z , мы учитываем особенность этих гексагональных структур, как одноосных структур.

Для гексагональных структур $RMnO_3$, где R – редкоземельные ионы Er, Tm, Yb, Lu и Y установлены корреляции t_x/t_z с изменениями спонтанной поляризации (деформации) от температуры и давления, с изменениями параметров решетки от радиусов ионов R и с концентрационными изменениями структурных параметров твердых растворов типа $R_{1-x}A_xMnO_3$ (A – Ca, La) [1-6]. Показано, что увеличению T_N соответствует уменьшение t_x/t_z , при увеличении внешнего давления t_x/t_z – увеличивается, температурным фазовым переходам в составах $RMnO_3$ и при концентрационных фазовых переходах $Y_{1-x}A_xMnO_3$ (A – Ca, La) соответствуют резкие изменения t_x/t_z .

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета

ЛИТЕРАТУРА

1. Nan T.-Ch., Hsu W.-L., and Lee W.-D. *Nanoscale Research Letters* **6**, 201 (2011).
2. Назаренко А.В., Чалый П.С., Рудская А.Г., Куприянов М.Ф. Труды симп. «LFPM-2013». Ростов-на-Дону, **2**, 30 (2013).
3. Козленко Д.П., Кичанов С.Е., Ли С., Парк Дж.-Г., Глазков В.П., Савенко Б.Н. *Письма в ЖЭТФ* **82**, 212 (2005).
4. Uusi-Esko K., Malm J., Imamura N. *Materials Chem. and Phys.* **112**, 1029 (2008).
5. Gao P., Chen Z., Tyson T.A., et. al. *Phys. Rev. B* **83**, 224113 (2011).
6. Разумная А.Г., Назаренко А.В., Рудская А.Г., Куприянов М.Ф. *Нано- и микросистемная техника* **8**, 21 (2013).

Эволюция структуры в керамиках $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$

Титов С.В.¹, Павленко А.В.¹, Кравчук К.С.², Шилкина Л.А.¹

¹НИИ физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, 344090, Россия
(E-mail: svtitov@sfsedu.ru)

²ФГБНУ Технологический институт свехтвердых и новых углеродных материалов,
Москва, 142190, Россия

Перспективной основой для сегнетомагнитных керамических материалов представляются твердые растворы (ТР) манганитов лантана и висмута $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$, которые испытывают при $T \sim 120\text{K}$ ферромагнитный фазовый переход и характеризуются сильным магнитодиэлектрическим эффектом. Однако, обратной стороной взаимовлияния различных подсистем в этих керамиках является высокая зависимость их свойств от реальной структуры, предопределяемой условиями получения. Целью работы являлось исследование нано-, мезо- и микроструктурной реорганизации в ряду ТР манганитов лантана и висмута при изменении их состава.

Объекты исследования - ТР состава $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$ с $0.30 < x < 0.70$, полученные по обычной керамической технологии с шагом по $x=0.10$. Рентгенографически определялся фазовый состав, параметры ячейки, степень совершенства кристаллической структуры. Зёрненная структура керамик исследована методами оптической микроскопии, мультифрактального сканирования, профилометрии, твердомерии в микро- и нано- диапазонах.

Установлено, что полученные керамические образцы однофазны и при комнатной температуре имеют структуры, близкие к кубической с параметрами ячейки, уменьшающимися с ростом x , что обусловлено меньшим ионным радиусом ионов La^{3+} в сравнении с Bi^{3+} . Увеличение x до 0.5 приводит к измельчению, уплотнению микроструктуры и совершенствованию формы кристаллитов, упрочнению керамики. При дальнейшем росте x структура разрыхляется и границы зёрен искривляются. Упрочнение обусловлено увеличением содержания Mn на границах кристаллитов, приводящим при спекании к образованию Mn-содержащих жидких фаз, связывающих зерна и увеличивающих прочность керамики. Результаты склерометрии (рис.1) и наноиндентирования показывают равномерную твердость в теле зерен керамики и её рост на границе, а также слабое различие в твердости зерен уже для ТР с $x=0.40$ и 0.50 . При $x=0.50$ выявлен полосовой характер в пространственном распределении величины параметра мультифрактальной однородности зеренной структуры, связанного с механическими напряжениями. Предпринятые комплексные исследования позволили выявить механизмы влияния изменений состава на структурные параметры $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$, важные для разработки сегнетомагнитных материалов нового поколения.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

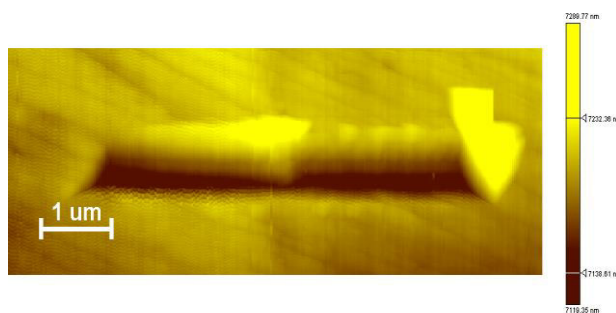


Рис. 1 Царапина (сканирующий нанотвердомер «НаноСкан-3D») поперёк границы двух зёрен в керамике $\text{Bi}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{MnO}_3$

Температурное поведение ротационных параметров порядка в твердом растворе $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$

**Троценко В.Г.^{1,2}, Михейкин А.С.^{1,3}, Широков В.Б.^{1,3}, Разумная А.Г.¹,
Кадыров Л.С.⁴, Горшунов Б.П.^{4,5}, Торгашев В.И.¹**

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006, Россия
(E-mail: vasilytrotsenko@live.ru)

²Laboratory of Condensed Matter Physics, University of Picardy, Amiens, 80039, France

³Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Россия

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700, Россия

⁵Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия

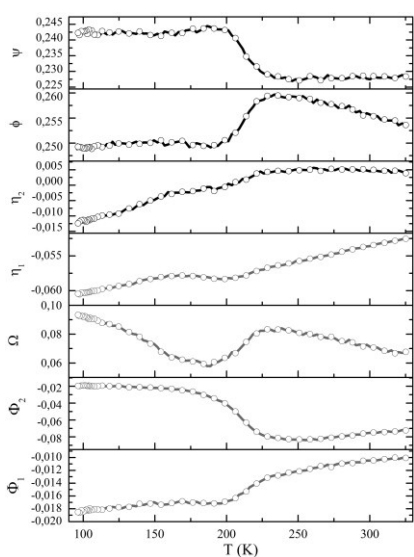


Рис.1. Температурное поведение ПП. Черным цветом показаны ПП, связанные с вращениями октаэдров.

ства с $a > c$ на $c > a$). В результате зависимость объема элементарной ячейки ниже температуры ЗУ в интервале 190-220 К имеет характерный для инвариного эффекта вид, связанного с аномальным поведением зависимостей длин связей и углов ионов, образующих магнитную подсистему.

По данным рентгеноструктурного анализа получено температурное поведение всех параметров порядка (ПП), связанных со смещениями атомов LCMO $x = 0.75$. Традиционно при переходе от исходной кубической фазы $Pm-3m$ к ромбической $Pnma$ основными ПП, достаточными для описания ротационных структурных превращений, принято считать ψ и ϕ , которые связывают соответственно с синфазным и антифазным поворотом жестких октаэдров вокруг направлений, параллельных a, b и c исходной кубической фазы. Хотя все ПП выражаются через относительные единицы смещений ионов, численные значения, приведенные на рис. 1, действительно свидетельствуют в пользу доминирования ротационных параметров ψ и ϕ , значения которых на порядок превышают значения всех остальных ПП, при переходе в ЗУ состояние. Однако более точная модель требует учитывать наличие искажений октаэдров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-12-00258).

В работе представлены результаты уточнения механизмов фазовых переходов передопированных манганитов на примере твердого раствора $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$.

Установлено, что в результате фазового перехода с мультипликацией объема элементарной ячейки и образованием пространственно неоднородного состояния в зарядово упорядоченной (ЗУ) фазе при понижении температуры наблюдается рост интенсивности в низкочастотной области спектра комбинационного рассеяния света, обусловленный образованием неоднородного (многофазного) состояния и фолдингом акустических фононов. При этом фонанный спектр первого порядка существенно не изменяется. Этот факт указывает, что фононная подсистема не играет ключевую роль в механизмах фазовых переходов в ЗУ и антиферромагнитное состояние в LCMO $x = 0.75$.

При понижении температуры до $T=T_{CO}$ устанавливается противоположное соотношение параметров элементарной ячейки (имеет место изменение неравенства с $a > c$ на $c > a$).

Ферроэлектрические свойства $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_7$

Удод Л.В.^{1,2}, Аплеснин С.С.^{1,2}, Ситников М.Н.²

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия (E-mail: luba@iph.krasn.ru)

²Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, 660014, Россия

Соединения со структурой пирохлора широко исследуются с целью создания электронных приборов и устройств хранения информации нового поколения. Смещение атома висмута в висмутсодержащих пирохлорах и одного из атомов кислорода от центра их позиций, характерных для идеальной структуры пирохлора, обуславливают такие явления как сегнетоэлектричество и ферромагнетизм. В $\text{Bi}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ ионы висмута имеют неподеленную электронную пару. Отсутствие центра инверсии может привести к спонтанной поляризации. Кристаллическая структура $\text{Bi}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ при комнатной температуре является искаженной кубической пирохлорной структурой и претерпевает три полиморфных перехода: до 360 К реализуется моноклинная α -фаза, между 360 и 950 К существует кубическая β -фаза, выше 950 К - кубическая гранецентрированная γ -фаза.

Целью работы является установление ферроэлектрических свойств и пироэлектрического эффекта в $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_7$, $0 \leq x \leq 0.15$.

Полевые зависимости вектора электрической поляризации получены из измерений заряда в зависимости от величины электрического поля при $T=300-550$ К с шагом 50 К, рис. 1. Так для $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{0.85}\text{Cr}_{0.15})_2\text{O}_7$, во всем регионе температур, за исключением 550 К, наблюдается петля гистерезиса, что является характерным признаком ферроэлектрических свойств. Ниже температуры перехода 370 К петля гистерезиса $P(E)$ симметричная, а выше смещается вдоль оси поляризации. Величина сдвига петли растет при нагревании. Причиной сдвига петли является термоэмиссионный ток j_t и пироэлектрический ток j_p . Остаточная поляризация (P_r) при $E=0$ возрастает с повышением температуры и претерпевает скачок с увеличением P_r в семь раз при структурном переходе, интерпретируется в модели с ферроэлектрическими доменами и полиморфным переходом по температуре. Ток в нулевом внешнем электрическом поле экспоненциально возрастает выше 460 К, хорошо описывается зависимостью $\lg(I)$ от $1000/T$ в интервале температур 470-750 К с энергией активации $\Delta E=1.12$ эВ и вызван пироэлектрическим эффектом и термоэдс. Коэффициент термоэдс меняет знак с отрицательного на положительный при $T=525$ К. Критическая температура исчезновения поляризации, сопровождается максимумом в температурной зависимости реальной и мнимой компонент диэлектрической проницаемости, сменой знака термоэдс по температуре и переходом от диффузионного процесса заряженных частиц к формированию заряженных областей на межкристаллических границах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ №17-42-240079 и 16-52-00045.

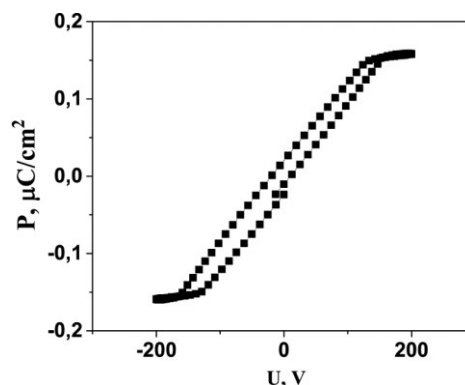


Рис. 1. Зависимость поляризации $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{0.95}\text{Cr}_{0.05})_2\text{O}_7$ от приложенного электрического поля при температуре $T=320$ К.

Структурные, магнитные и магнитоэлектрические свойства халькогенидов TlInS_2 и TlGaSe_2 с имплантированной примесью кобальта

**Хайбуллин Р.И.¹, Валеев В.Ф.¹, Лядов Н.М.¹, Нуждин В.И.¹,
Максутоглы М.², Микаилзаде Ф.А.^{2,3}, Алиева В.Б.³, Маммадов Т.Г.³**

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН,
Сибирский тракт 10/7, Казань, 420029, Россия (E-mail: rik@kfti.knc.ru)

²Технологический Университет, Гебзе-Коджаели, 41400,
Турция (E-mail: faik@gtu.edu.tr)

³Институт Физики НАН Азербайджана, пр. Г. Джавида 33, Баку, Азербайджан

С целью создания нанокompозитных мультиферроиков ионы Co^+ с энергией 40 кэВ были имплантированы в сегнетоэлектрические пластинки слоистых кристаллов тройных халькогенидов, TlInS_2 и TlGaSe_2 , с дозами в интервале $(0.5-1.5) \times 10^{17}$ ион/см². Проведены исследования элементного состава и морфологии поверхности имплантированных образцов, а также их магнитных и диэлектрических свойств в широком интервале температур от 10 до 400 К. Установлено, что в результате ионного облучения на исходно атомарно гладкой поверхности образцов формируется развитый рельеф в форме нерегулярных возвышенностей новой фазы с повышенным содержанием индия (или галлия). Кроме этого, имплантации кобальта с высокими дозами обуславливает формированию наночастиц магнитного кобальта с размерами 5-10 нм в поверхностном слое халькогенидов. Имплантированные с максимальной дозой образцы проявляют ферромагнетизм при комнатной температуре [1]. Формирование магнитных наночастиц кобальта в имплантированных пластинах TlInS_2 и TlGaSe_2 приводит к значительному сдвигу (~ 10 К) точек фазовых переходов (T_c) в область более высоких температур при нагревании образцов от температуры жидкого азота к комнатной температуре (см. рис. 1). При приложении сильного внешнего магнитного поля наблюдается возврат точек фазового перехода к значениям, характерным для исходных кристаллов [2]. Сдвиги величин T_c обусловлены либо сильными напряжениями, индуцированными в объеме халькогенидов ионной имплантацией, либо пиннингом сегнетоэлектрических доменов за счет магнитных включений кобальта.

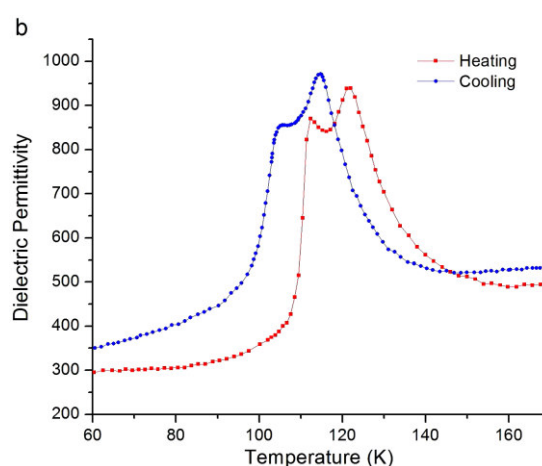


Рис. 1 Температурные зависимости диэлектрической проницаемости для пластинки TlGaSe_2 , имплантированной с дозой 1.0×10^{17} ион/см² и регистрируемые при охлаждении, а затем при нагревании образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Mikailzade, A.G. Şale, R.I. Khaibullin et al., Solid Stat. Commun. **152**, 407 (2012).
2. F. Mikailzade, M. Maksutoglu, R.I. Khaibullin et al., Phase Transitions **89**, 568 (2016).

Фазовый состав, диэлектрические спектры и температуропроводность твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$

Хасбулатов С.В.¹, Павелко А.А.¹, Шилкина Л.А.¹, Бакмаев А.Г.², Резниченко Л.А.¹

¹Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: said_vahaevich@mail.ru)

²Институт физики им. Х.И.Амирханова Дагестанского научного центра РАН Махачкала, 367010, Россия

Целью настоящей работы явилось установление закономерностей формирования корреляционных связей состав – структура (фазовая диаграмма) – свойства (диэлектрические спектры, температуропроводность) в твердых растворах (ТР) вида $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0.05\text{--}0.20$, $\Delta x = 0.05$). Керамические образцы получены двухстадийным твердофазным синтезом из оксидов Bi_2O_3 , Fe_2O_3 , $(\text{PЗЭ})_2\text{O}_3$ высокой степени чистоты (чда, осч) при температурах из интервала $T_{1,2\text{синт}} = (1073\text{--}1173)$ К, $\tau_{1,2\text{синт}} = 6$ ч. с последующим спеканием по обычной керамической технологии при температурах, $T_{\text{сп}}$, равных 1203 К, $\tau_{\text{сп}} = 1,5$ ч. На рис. 1 приведены результаты рентгеноструктурного исследования ТР $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$. Рентгенофазовый анализ показал, что все исследованные ТР содержат примесные фазы $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ (1), $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ (2), обычно сопутствующие образованию BiFeO_3 , и фазы со структурой типа граната $\text{PЗЭ}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (3), концентрация которых варьируется в зависимости от концентрации РЗЭ.

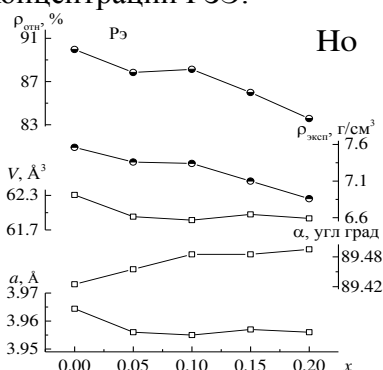


Рис. 1. Зависимости структурных параметров. (x) – параметр a, угол α , объем V ромбоэдрической ячейки.

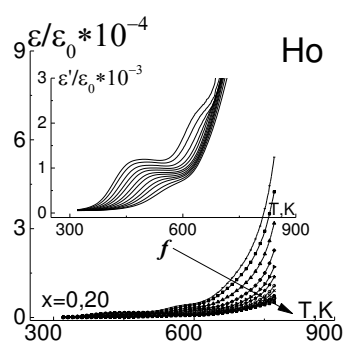


Рис. 2. Зависимости ϵ/ϵ_0 (Т) образцов керамики $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$ $x=0,20$ от температуры в интервале частот $(25\text{--}1,2 \times 10^6)$ Гц (стрелкой указан рост частот, f).

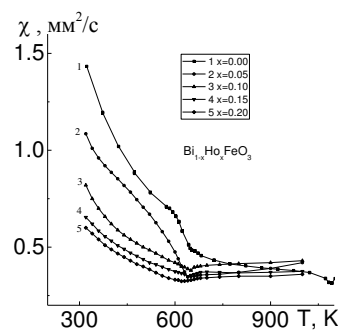


Рис. 3. Зависимости температуропроводности, χ , керамики $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$ $x=0,00\text{--}0,20$ от температуры.

Результаты исследования зависимостей ϵ/ϵ_0 образцов керамик от температуры приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, в областях 400–500 К формируются два сильно дисперсионных максимума ϵ/ϵ_0 , особенностью которых является сдвиг в высокотемпературную область, уменьшение и размытие при увеличении частоты. Подобные явления, как правило, связывают с релаксацией свободных зарядов на поверхностях раздела компонентов на фоне межслоевых, межфазных и внутрифазных перестроек. Зависимости теплофизический свойств исследованных объектов от температуры испытывают минимумы вблизи температуры Нееля ($T_N \sim 643$ К).

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

Диэлектрические свойства и температуропроводность сегнетомагнетика $\text{Bi}_{1-x}\text{Tm}_x\text{FeO}_3$

Хасбулатов С.В.¹, Павелко А.А.¹, Шилкина Л.А.¹, Бакмаев А.Г.², Резниченко Л.А.¹

¹Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: said_vahaevich@mail.ru)

²Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН Махачкала, 367010, Россия

Исследованиям мультиферроиков на основе феррита висмута уделяется большое внимание в связи с сочетанием в них как магнитного ($T_N \sim 643$ К), так и сегнетоэлектрического ($T_C \sim 1083$ К) упорядочений. Однако синтез термически устойчивых порошковых продуктов, пригодных для получения керамик, затруднен. Введение РЗЭ позволяет стабилизировать структуру феррита висмута, оптимизировать его свойства, а также усилить взаимодействие между магнитными и электрическими свойствами за счет подавления пространственно-модулированной магнитной структуры.

Объектами выступили твердые растворы (ТР) состава $\text{Bi}_{1-x}\text{Tm}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0.05-0.20$, $\Delta x = 0.05$). Образцы получены двухстадийным твердофазным синтезом из оксидов Bi_2O_3 , Fe_2O_3 , $(\text{РЗЭ})_2\text{O}_3$ высокой степени чистоты (чда, осч) при температурах из интервала $T_{1,2\text{синт}} = (1073 \div 1123)$ К, $\tau_{1,2\text{синт}} = 6$ ч. с последующим спеканием по обычной керамической технологии при температурах, $T_{\text{сп}}$, равных (1163К), $\tau_{\text{сп}} = 1,5$ ч.

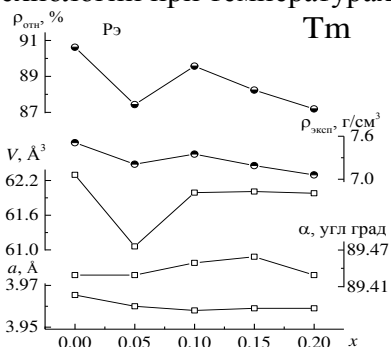


Рис. 1. Зависимости структурных параметров и экспериментальной, $\rho_{\text{экс}}$ и относительной, $\rho_{\text{отн}}$ плотностей от концентрации Тм (x): параметр a , угол α , объем V ромбоэдрической ячейки.

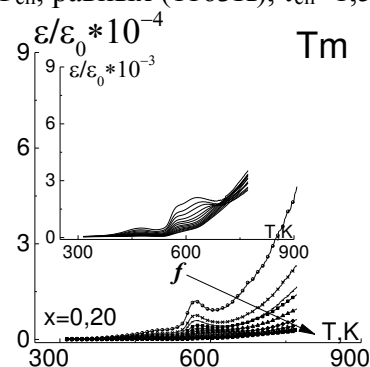


Рис. 2. Зависимости ϵ/ϵ_0 (Т) образцов керамики $\text{Bi}_{1-x}\text{Tm}_x\text{FeO}_3$ $x=0,20$ от температуры в интервале частот $(25 \div 1,2 \cdot 10^6)$ Гц (стрелкой указан рост частот, f).

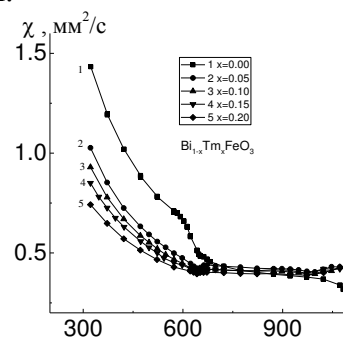


Рис. 3. Зависимости температуропроводности, χ , керамики $\text{Bi}_{1-x}\text{Tm}_x\text{FeO}_3$ $x=0,00-0,20$ от температуры.

На рис. 1 представлены результаты рентгеноструктурного исследования образцов ТР $\text{Bi}_{1-x}\text{Tm}_x\text{FeO}_3$. Все исследованные ТР содержат примесные фазы $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ и $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$, количество которых увеличивается с ростом x . На рис. 2 приведены результаты исследования зависимостей ϵ/ϵ_0 образцов керамик от температуры при разных частотах измерительного переменного электрического поля. В областях 400–500 К формируются дисперсионные максимумы $\epsilon/\epsilon_0(T)$, особенностью которых является сдвиг в высокотемпературную область, уменьшение и размытие их пиковых значений при увеличении частоты. В теплопроводности видны минимумы вблизи температуры Нееля.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

Локальное переключение поляризации в керамике феррита висмута

Абрамов А.С.¹, Аликин Д.О.¹, Турыгин А.П.¹, Walker J.B.^{2,3}, Rojac T.³, Шур В.Я.¹, Холкин А.Л.^{1,4}

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: alexander.abramov@urfu.ru)*

²*Materials Research Institute, Pennsylvania State University, PA, USA*

³*Electronic Ceramic Department, Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia*

⁴*Dept. of Materials and Ceramics Engineering & CICECO, University of Aveiro, Portugal*

Одной из принципиальных экологических проблем при производстве пьезоэлектрических устройств различного применения является использование цирконата-титаната свинца (PZT), который обладает отличными электромеханическими характеристиками, но создаёт повышенную опасность для человека при производстве и переработке. Последние десятилетия исследователи пытаются получить бессвинцовые керамики, способные заменить ЦТС без потерь в электромеханических характеристиках. Одним из перспективных материалов является бессвинцовый мультиферроик феррит висмута (BFO) [1]. Принципиальной проблемой керамики является большие токи утечки. Для снижения проводимости используют легирование редкоземельными элементами: Sm, La, Pr, приводящее к возникновению области морфотропной фазовой границы (МФГ) с сосуществованием наноразмерных фаз. В тонких плёнках ФВ в области МФГ наблюдается увеличение пьезоэлектрических коэффициентов.

В работе исследовались керамики ФВ, легированные Sm, с составом вблизи МФГ, синтезированные методом традиционного твердофазного синтеза и с дополнительной механохимической активацией [2]. Анализ методом рентгеновской дифракции и силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика показал, что соотношения и распределения структурных фаз зависят от степени легирования. Керамики с одинаковой степенью легирования, полученные различными способами имели различные распределения фаз. Активация приводила к большему перемешиванию фаз и образованию сложных структурных состояний [3], а также к движению доменных стенок при переключении поляризации за пределы границ зерен. Впервые экспериментально продемонстрирована локальная трансформация антиполярной фазы в полярную под действием электрического поля в керамике ФВ. Индуцированные фазовые состояния частично релаксировали через несколько минут после приложения поля и далее оставались неизменными в течении времени более суток.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при финансовой поддержке РФФИ (Грант 16-32-60083-mol_a_dk).

ЛИТЕРАТУРА

1. Walker J., Bryant P., Kurusingal V., et al., Acta Mater. **83**, 149 (2015).
2. Fujino S., Murakami M., Anbusathaiah V., et al., Appl. Phys. Lett. **92**, 202904 (2008).
3. Alikin D.O., Turygin A.T., Walker J., et al., Acta Mater. **125**, 265 (2017).
4. Aksel E., Jones L.J., Sensors **10**, 1935 (2010).

Особенности токов переключения в монокристаллах титанил-фосфата калия

Ахматханов А.Р.¹, Васькина Е.М.¹, Чувакова М.А.¹, Пелегова Е.В.¹,
Шур В.Я.¹, Холкин А.Л.²

¹Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: ekaterina.vaskina@urfu.ru)

²Department of Physics and CICECO-Aveiro Institute of Materials, Aveiro University, Aveiro, 3810-193, Португалия

Представлен анализ токов переключения в монокристаллах титанил-фосфата калия (KTiOPO₄, КТР) при переключении поляризации в широком диапазоне однородных внешних электрических полей.

Кристаллы имели объемную проводимость около $3 \cdot 10^{-9}$ Ом⁻¹см⁻¹. Исследованные образцы были вырезаны перпендикулярно полярной оси. Ток переключения регистрировался одновременно с визуализацией кинетики доменной структуры. Показано, что ток переключения может быть разделен на две части: (1) плавный ток, соответствующий двумерному росту изолированных доменов под электродом практически без слияния, (2) скачкообразный ток, соответствующий интенсивному слиянию доменов. Форма тока переключения на второй стадии качественно изменяется с увеличением прикладываемого электрического поля. В слабых полях (3-4 кВ/мм) ток переключения представляет собой набор изолированных пиков, а в сильных полях (> 4 кВ/мм) превращается в непрерывный ток переключения с малыми колебаниями. Первая часть тока проанализирована в рамках модифицированной модели Колмогорова-Аврами [1,2]. Токи, полученные при переключении поляризации в слабых полях, проанализированы модифицированным методом Корчака, позволившего разделить кумулятивные функции распределения времен скачка и покоя доменной стенки. Показатель Херста 0.58 ± 0.02 указывает на то, что переключение поляризации представляет собой слабый персистентный процесс с долговременной корреляцией.

Переключение поляризации прямоугольными импульсами позволило выявить активационную полевую зависимость времени переключения с полем активации 9,4 кВ/мм. Зависимость коэрцитивного поля (E_c) от скорости нарастания внешнего поля dE_{ex}/dt была измерена при приложении треугольных биполярных импульсов. Полученная зависимость $E_c(dE_{ex}/dt)$ для прямого переключения была аппроксимирована степенным законом [3,4]. Определена величина коэрцитивного поля при квазистатическом переключении (при dE_{ex}/dt стремящемся к нулю) ($E_{c,stat} = 2,5$ кВ/мм).

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ, при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Акт 211, Соглашение 02.А03.21.0006), РФФИ (Грант 16-02-00724-а) и гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых (договор №14.У30.17.2837-МК).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kolmogorov A.N. *Izv. Acad. Nauk USSR; Ser. Math.* **3**, 355 (1937).
2. Shur V.Ya., Rumyantsev E.L., and Makarov S.D. *JAP* **84**, 445 (1998).
3. Hashimoto S., Orihara H., Ishibashi Y. *Phys. Soc. Japan* **63**, 1601 (1994).
4. Orihara H., Hashimoto S., Ishibashi Y. *Phys. Soc. Japan* **63**, 1031 (1994).

Формирование доменной структуры в кристаллах ниобата лития, легированного MgO, при облучении сфокусированным ионным пучком

**Власов Е.О.¹, Чезганов Д.С.^{1,2}, Гимадеева Л.В.¹, Ахматханов А.Р.^{1,2},
Чувакова М.А.¹, Аликин Д.О.¹, Шур В.Я.^{1,2}**

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский Федеральный Университет,
Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: evgeny.vlasov@urfu.ru)*

²*ООО «Лабфер», Екатеринбург, 620014, Россия*

Проведено комплексное экспериментальное исследование формирования доменной структуры в монокристаллах ниобата лития, легированного MgO (MgOLN). Результаты использованы для формирования регулярных доменных структур (РДС) высокого качества с малыми периодами [1].

Формирование доменной структуры проводилось облучением ионным пучком Z^+ -полярной поверхности пластин MgOLN толщиной 1 мм, отполированных до оптического качества, при помощи рабочей станции Auriga Crossbeam (Carl Zeiss). Управление разверткой и положением пучка осуществлялось с использованием системы ионно-лучевой литографии Raith Multibeam. Облучаемая поверхность образца покрывалась 500 нм слоем резиста, а противоположная – 100 нм Cu электродом и заземлялась во время облучения. Полученная доменная структура была визуализирована при помощи оптической микроскопии после селективного химического травления, а также методами высокого разрешения: сканирующей зондовой микроскопией (СЗМ), конфокальной микроскопией комбинационного рассеяния и сканирующей электронной микроскопией.

Точечное облучение приводило к формированию изолированных доменов. Выявленное изменение размера и формы доменов с ростом дозы было объяснено в рамках кинетического подхода, с учетом модификации поверхности под действием ионов, локального удаления поверхностного слоя и изменения условий экранирования. Было показано, что полученные зависимости от дозы размеров доменов, образовавшихся под действием пространственно неоднородного поля, создаваемого локализованным зарядом, аналогичны результатам локального переключения при помощи проводящего зонда СЗМ. Для объяснения полученных результатов предполагалось, что переключение поляризации происходит в постоянном поле, создаваемом зарядом, локализованным в слое резиста, причем время облучения много меньше времени релаксации заряда.

Полученные знания были использованы для создания высококачественных РДС с малыми периодами: (1) двумерной матрицы изолированных доменов радиусом около 300 нм, периодом 1 мкм, и глубиной 400 мкм, (2) одномерная регулярная структура сквозных полосовых доменов с периодом 2 мкм в пластине толщиной 1 мм.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ, при финансовой поддержке РФФИ (15-32-21102-мол_a_вед), гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-8441.2016.2) и Правительства Российской Федерации (постановление 211, контракт 02.А03.21.0006).

ЛИТЕРАТУРА

1. Chezganov D.S., Shur V.Ya, et al. Appl. Phys. Lett. **110**, 052708 (2017).

Формирование электронным пучком регулярной доменной структуры в волноводах, созданных методом мягкого протонного обмена в ниобате лития

**Гимадеева Л.В.¹, Чезганов Д.С.¹, Власов Е.О.¹, Нерадовский М.М.^{1,2},
Колчина Е.А.¹, Чувакова М.А.¹, Tronche H.², Dautre F.², Baldi P.²,
De Micheli M.P.², Шур В.Я.¹**

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: lv.gimadeeva@urfu.ru)*

²*Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, University of Nice-Sophia Antipolis, Nice 06100, France*

Процесс мягкого протонного обмена (Soft Proton Exchange, SPE) [1] позволяет создавать в ниобате лития (LN) волноводы с большим изменением показателя преломления, сохраняя сегнетоэлектрические свойства. Как правило, такие волноводы изготавливают после создания доменной структуры. Нами была продемонстрирована возможность формирования доменных структур в LN с планарными и канальными SPE волноводами с помощью облучения сфокусированным электронным пучком [2,3].

Исследовались пластины конгруэнтного LN толщиной 0,5 мм. Процесс SPE проводился в бензойной кислоте с концентрацией бензоата лития 3,1% при 300°C в течение 70 часов. Доменная структура формировалась в результате облучения пучком электронов Z⁻поверхности пластин, покрытых 2,5 мкм слоем резиста. Облучение производилось с помощью сканирующего электронного микроскопа Auriga Crossbeam с системой электронно-лучевой литографии Elphy Multibeam. Доменная структура исследовалась сканирующей микроскопией пьезоэлектрического отклика.

Выявлены четыре типа доменных структур, формирующихся при полосовом облучении при различных дозах. Показано, что при дозах более 0,7 мК/см² образуются полосовые домены глубиной до 150 мкм, ширина которых линейно зависит от дозы. Выявленное формирование изолированных субмикронных доменов представляет собой дискретное переключение за счет неэффективного экранирования деполяризующего поля в сегнетоэлектрике с диэлектрическим поверхностным слоем. Показано, что слой резиста является ключевым для создания регулярных доменных структур в CLN SPE.

Показано, что точечное облучение приводит к формированию изолированных доменов круглой формы. Увеличение дозы не приводит к изменению формы доменов, а зависимость размеров доменов от дозы подобна полученной ранее в MgOLN [3]. Впервые продемонстрирована возможность создания доменов произвольной формы.

Полученные результаты позволили создать регулярную доменную структуру в SPE канальном волноводе, которая была использована для генерации второй гармоники. Нормированная эффективность преобразования 50%/(Вт×см²) сравнима с эффективностью коммерческих образцов.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ, при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-8441.2016.2) и Правительства РФ (постановление 211, контракт 02.A03.21.0006).

ЛИТЕРАТУРА

1. De Micheli M. P., *Ferroelectrics*, **340**, 49 (2006).
2. Chezganov D.S., *Appl. Phys. Lett.* **108**, 192903 (2016).
3. Shur V.Ya., Chezganov D.S., et al. *Appl. Phys. Lett.* **106**, 232902 (2015).

Корреляционные эффекты при формировании доменной структуры кристалла триглицинсульфата вблизи температуры фазового перехода

Голицына О.М.¹, Дрождин С.Н.¹, Чулакова В.О.¹

¹Воронежский государственный университет Воронеж, 394006, Россия
(E-mail: golitsynaom@yandex.ru)

Методом атомной силовой микроскопии в режиме пьезоэлектрического отклика исследовалось возникновение доменной структуры в кристалле триглицинсульфата (ТГС) и ее последующая эволюция в температурной области вблизи фазового перехода (интервал $321 \text{ K} \leq T < T_C = 322 \text{ K}$). Текущее состояние доменных картин, как совокупности областей с «параметром порядка» $S(r,t)$, принимающим значения +1 или -1 для доменов с противоположным направлением поляризации, описано пространственно-временными корреляционными функциями $C(r;t) = \langle S(r;t)S(0,t) \rangle$ [1] (рис.1)

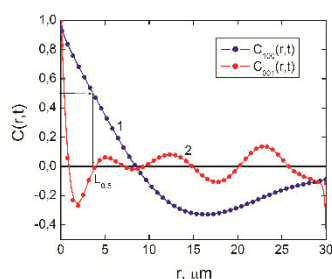


Рис.1. Определение корреляционной длины с помощью корреляционной функции: 1- направление [100]; 2- направление [001].

Показано, что степень коррелированности одинаково поляризованных доменов изменяется во времени и зависит от температуры. При различном удалении от T_C проанализировано временное поведение характеристической длины L , как меры среднего размера доменов. Возрастание во времени приведенной характеристической длины ($L_{0,5}/L_0$) подчиняется степенному закону с показателем φ (рис.2), изменение значений которого отражает особенности процессов формирования доменной структуры.

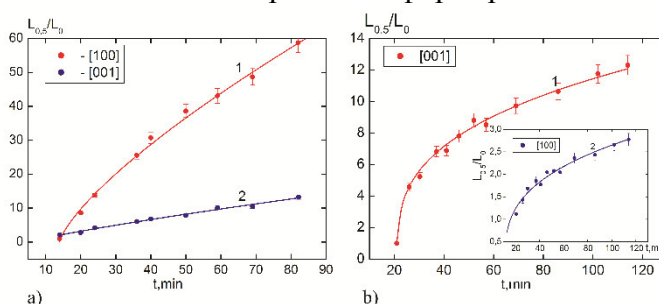


Рис.2. Зависимость приведенной характеристической длины $L_{0,5}/L_0$ от времени: а) при температуре $T=321,9 \text{ K}$ в направлении [100] -1; в направлении [001]-2; б) при температуре $T=321 \text{ K}$ в направлении [100] -1;г)- в направлении [001] -2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tomita N., Orihara H., and Ishibashi Y. // *J. of the Phys. Society of Jap.*, 1989, vol. 58, p. 1190-1196.

Процессы поляризации и акустические свойства бессвинцовой керамики на основе KNN модифицированной барием

Бурханов А.И.¹, Жирков А.В.¹, Борманис К.², Антонова М.²,
Калване А.²

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, 400005,
(E-mail: burkhanov@inbox.ru)

²Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Riga, Kengaraga str.8, LV-1063, Latvia,
(E-mail: bormanis@cfi.lu.lv)

В керамике $(K_{0.5}Na_{0.5})(Nb_{0.93}Sb_{0.07})O_3+xBaTiO_3+0.5mol.\%MnO_2$ ($x = 0.01, 0.02, 0.04$), (KNN-xBa), изготовленной традиционным методом твердофазного синтеза, исследованы процессы поляризации и переполяризации в широкой области температур. Выявлены особенности в поведении характера диэлектрической нелинейности в области структурного и сегнетоэлектрического фазовых переходов в данном материале. Результаты по диэлектрическому отклику образцов сопоставляются с поведением упругих свойств при различном содержании BaTiO₃ в керамике KNN.

При изучении электрофизических свойств данной керамики использовались серебряные электроды. Толщины образцов составляли от 0,5 мм до 1мм. Изучение

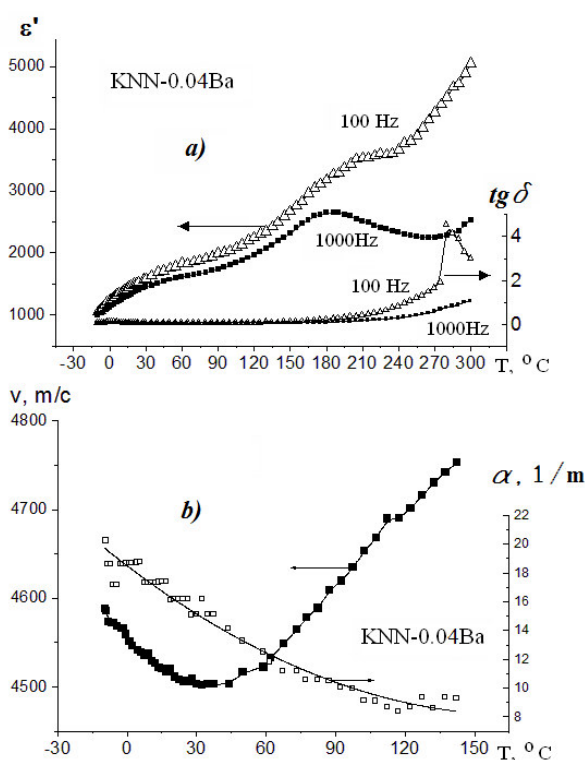


Рис. 1. Зависимости $\epsilon'(T)$ и $tg\delta(T)$ на частоте 100 и 1000 Гц (а); $v(T)$ и $\alpha(T)$ в керамике $(K_{0.5}Na_{0.5})(Nb_{0.93}Sb_{0.07})O_3+0.04BaTiO_3+0.5mol.\%MnO_2$

диэлектрического отклика осуществлялось с применением RLC – измерителей (E7-15 – слабые поля) и на основе анализа петель поляризации полученных на частотах 1 Гц -10 Гц с применением модифицированной схемы Соьера–Тауэра (средние и сильные поля). Измерение скорости продольных звуковых волн осуществлялось с применением резонансного метода на образцах, приготовленных в виде небольших стержней длиной от 12 до 18 мм и толщиной 1,5-2 мм.

Рисунок 1 а, б иллюстрирует для одного из составов KNN-xBa поведение температурных зависимостей диэлектрической проницаемости $\epsilon'(T)$ и тангенса потерь $tg\delta(T)$ для слабых измерительных полей - (а), скорости; $v(T)$ и коэффициента поглощения $\alpha(T)$ ультразвуковой волны (б).

Обсуждение полученных результатов ведется в рамках подходов, рассматривающих вклад различного типа доменных границ в области температур сосуществования ортором-

бической и тетрагональной фаз в системе KNN.

О возможности детектирования доменов в кристалле LiNbO_3 при помощи рамановской спектроскопии

Черных С.Г.^{1,2}, Коханчик Л.С.¹, Иржак А.В.^{1,2}, Иржак Д.В.¹

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка, 142432, Россия (E-mail: airzhak@iptm.ru)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, 119991, Россия

Кристаллы ниобата лития (НЛ, LiNbO_3) с регулярными доменными структурами (РДС) являются перспективными как для оптических, так и для акустоэлектрических преобразований. Одним из методов создания РДС является метод записи электронным лучом в растровом электронном микроскопе (РЭМ) [1,2]. Рамановская спектроскопия (РС) в сочетании с конфокальной микроскопией может стать одним из перспективных методов исследования индивидуальных доменов и РДС. Этот метод структурно чувствителен, локален и позволяет определять области различной поляризации как в плоскости, так и по глубине образца. Целью данного исследования было определить глубину залегания записанного электронным лучом планарного домена при помощи РС.

Доменные структуры были созданы на пластине НЛ Y-среза в растровом электронном микроскопе JSM 840A. Использовалось ускоряющее напряжение $U = 25$ кВ, ток $I = 0,1$ нА, площадь локального облучения $S_{\text{ит}} = 0,5$ мкм². Домены росли из точки облучения в направлении +Z в поверхностном слое образца.

После записи электронным лучом поверхность кристалла исследовалась на спектрометре Senterra фирмы Bruker. На вставке к рис. 1 представлено изображение 180° планарного домена в поляризованном свете. Спектры РС были получены при облучении лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 10 мВт на различной глубине кристалла (от 0 до 20 мкм) в центре и вне домена (рис. 1). Нормировка показала изменение интенсивностей отдельных пиков РС по глубине образца в области домена. График зависимости интенсивности пика 152 см⁻¹ от глубины приведен на рис. 2. Рост интенсивности происходит до глубины кристалла ~5 мкм, что хорошо согласуется с данными [2] для планарных доменов сформированных при $U=25$ кВ.

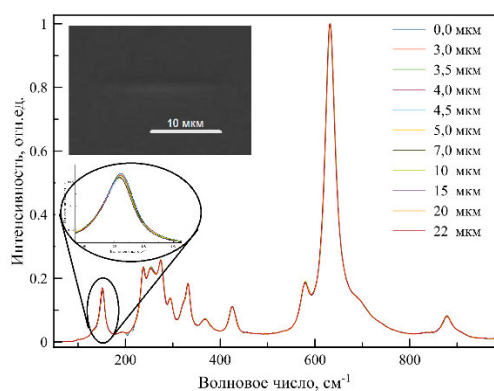


Рис. 1. Спектр НЛ из области домена. На врезке - оптическое изображение домена

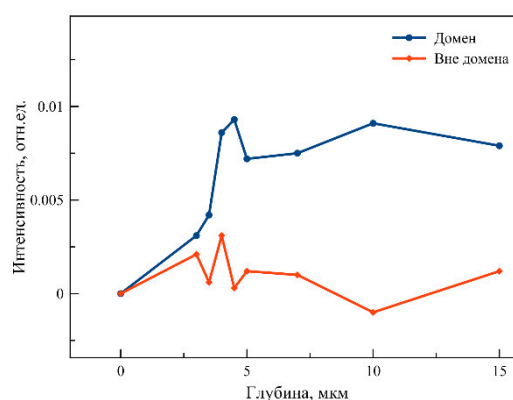


Рис. 2. Зависимость интенсивности пика 152 см⁻¹ от глубины

ЛИТЕРАТУРА

1. Kokhanchik L.S., Borodin M. V., Shandarov S. M., e.a. Phys. Solid State **58**, 1722 (2010).
2. Kokhanchik L.S., Gainutdinov R.V., Lavrov S.D., e.a. J Appl.Phys. **118**, 72001, (2015).

Переключение переполаризации в заряженной доменной границе в тонкой сегнетоэлектрической пленке

Лазарев А.П.¹, Сигов А.С.², Даринский Б.М.¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» Воронеж, 394000, Россия
(E-mail: lazarevap50@mail.ru)

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский технологический университет", Москва, 119454, Россия

Рассматривается тонкая сегнетоэлектрическая пленка нанометровой толщины, в которой возможные направления вектора спонтанной поляризации лежат в плоскости и перпендикулярно ориентации пленки.

В пленке создана заряженная доменная граница между контактирующими доменами с параллельными, но противоположно направленными векторами спонтанной поляризации. Определены условия, при которых в переходном слое заряженной доменной границы возникает компонента спонтанной поляризации, перпендикулярная плоскости пленки. Переходный слой при этом рассматривается как сегнетоэлектрический домен со спонтанной поляризацией, перпендикулярной плоскости пленки. Получены аналитические выражения для эффективного дипольного момента границы и для поля переполаризации. Предлагается система электродов вдоль поверхности сегнетоэлектрической пленки с многопроводной системой электрических проводов для покрытой диэлектриком сегнетоэлектрической тонкой пленки на металлической подложке.

Рассмотренная система обеспечивает переключение сегнетоэлектрических доменов, что позволяет использовать ее в качестве ячейки памяти в компьютерных устройствах, аналогичных БИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даринский Б.М., А.П. Лазарев, Сигов А.С. Переключение доменов в доменных границах // Конденсированные среды и межфазные границы. — Воронеж, 2013. — Т. 15, № 3, С.288-291.

Формирование доменной структуры в LiNbO_3 с неоднородной объемной проводимостью

Пряхина В.И., Аликин Д.О., Негашев С.А., Шур В.Я.

Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: viktoria.pryakhina@urfu.ru)

Для неоднородного изменения проводимости монокристаллов ниобата лития (LiNbO_3 , LN) использовалось ионно-плазменное облучение Z^+ полярной поверхности и восстановительный отжиг [1].

Известно, что высокотемпературная обработка LN в бескислородной атмосфере приводит к увеличению объемной проводимости вследствие аут-диффузии кислорода с поверхности и сегрегации лития. Диффузионная природа процессов и короткое время обработки позволяют создать неоднородное по объему распределение проводимости. При переключении поляризации такая проводимость приводит к неоднородному распределению приложенного поля в объеме кристалла и созданию заряженных доменных стенок.

Исследовались пластины конгруэнтного LN толщиной 0.5 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси Z . Переключение поляризации осуществлялось приложением импульсов растущего электрического поля с использованием жидких электродов. Для *in situ* исследования эволюции доменной структуры использовалась установка на базе поляризационного оптического микроскопа. Исследование распределения приложенного электрического поля производилось интерференционным методом на основе линейного электрооптического эффекта [2].

Визуализация статической доменной структуры на поверхности кристалла проводилась с помощью сканирующей микроскопии пьезоэлектрического отклика, а в объеме – с помощью конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния и оптической микроскопии после селективного химического травления Y срезов кристалла.

Переключение поляризации в растущем поле в отожженных образцах приводит к формированию несквозных доменов вблизи полярных поверхностей. Пороговое поле для формирования доменной структуры на Z^- поверхности существенно меньше, чем для Z^+ (12 кВ/мм и 18 кВ/мм, соответственно). В то же время, в образцах с ионно-плазменным облучением не наблюдался рост доменной структуры на Z^+ поверхности.

Установлено, что под воздействием пьезоэлектрического поля при быстром охлаждении кристалла на Z^- полярной поверхности формируются зародыши. Переключение поляризации на Z^- полярной поверхности начинается с появления оптического контраста и прорастания зародышей в объем. Боковое движение и слияние доменов в объеме приводит к формированию заряженных доменных стенок с ориентацией голова-к-голове вблизи Z^- поверхности и хвост-к-хвосту в объеме кристалла, обладающих качественно различной геометрией. При увеличении приложенного поля до 18 кВ/мм начинается формирование несквозной доменной структуры на Z^+ поверхности.

В работе использовалось оборудование Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии» ИЕНиМ УрФУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pryakhina V.I., Alikin D.O., Palitsin I.S., et al. *Ferroelectrics* **476**, 109 (2015).
2. Pryakhina V.I., Alikin D.O., Negashev S.A., Shur V.Ya. *Ferroelectrics* **508**, (2017) *in print*

Исследование эффекта самоорганизованного роста доменов в неполярных срезах ниобата лития

Турьгин А.П., Аликин Д.О., Аликин Ю.М., Шур В.Я.

Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: anton.turygin@urfu.ru)

Исследования доменной структуры в монокристаллах ниобата лития (LN) представляют значительный интерес для устройств преобразования частоты лазерного излучения на основе регулярных микро- и нано-доменных структур и хранения данных со сверхвысокой плотностью записи информации [1]. Было продемонстрировано формирование самоорганизованных структур при локальном переключении поляризации на полярных поверхностях под действием поля, создаваемого проводящим зондом сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) [2]. Первые результаты экспериментального исследования роста доменов на неполярных срезах кристаллов LN с высоким пространственным разрешением были опубликованы лишь недавно [3,4].

В работе проведены результаты экспериментального исследования формирования самоорганизованной структуры клиновидных доменов на неполярных срезах конгруэнтного LN. Доменная структура визуализировалась с помощью сканирующей микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМПО). Для измерения поверхностного потенциала использовалась сканирующая микроскопия зонда Кельвина (СМЗК).

Экспериментально приложением прямоугольного переключающего импульса формировался одиночный «исходный» клиновидный домен. Было впервые обнаружено, что при последующем перемещении по поверхности заземленного зонда СЗМ (без поля) образуются квазирегулярные цепи клиновидных доменов с периодически изменяемой длиной. Важно отметить, что эффект самоорганизованного роста наблюдается на расстояниях порядка десятков микрометров от исходного домена.

Обнаруженный эффект отнесен на счет локального внешнего экранирования в точке касания поверхности заземленным электродом при переключении поляризации под действием поля, создаваемого зарядом, инжектированным при приложении импульса напряжения [5]. Измерение поверхностного потенциала с помощью СМЗК подтвердило, что инжектированный заряд, распространяется от зонда на расстояние порядка десятков микрометров. Периодическое изменение длины доменов обусловлено электростатическим взаимодействием [2].

Продemonстрированные явления могут быть интересны как для изучения самоорганизованного роста доменов и взаимодействия заряженных доменных стенок, так и для исключения паразитный эффект при локальном переключении поляризации.

В работе было использовано оборудование Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии» УрФУ. Исследование было выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант 14-12-00826).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shur V.Ya., Akhmatkhanov A.R., and Baturin I.S., Appl. Phys. Rev., **2**, 040604 (2015).
2. Ievlev A.V., Jesse S., Morozovska A.N. et al., Nature Physics, **10**, 59 (2014).
3. Alikin D.O., Ievlev A.V., Turygin A.P. et al., Appl. Phys Lett., **106**, 182902 (2015).
4. Ievlev A.V., Alikin D.O., Morozovska A.N. et al., ACS nano, **9**, 769 (2014).
5. Fregatov S.O. and Sherman A.B., Phys. Solid State, **41**, 457 (1999).

Переключение поляризации и кинетика доменов в монокристаллах PMN-0,3PT

Шур В.Я.¹, Ахматханов А.Р.¹, Грешняков Е.Д.¹, Ушаков А.Д.¹,
Васькина Е.М.¹, Аликин Д.О.¹, Wei X.², Xu Z.², Li Z.², Wang S.²,
Zhuang Y.², Hu Q.²

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: andrey.usakov@urfu.ru)*

²*Electronic Materials Research Laboratory, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China*

Процесс ориентации доменов и кинетика доменной структуры в поле были изучены в монокристаллах релаксорного сегнетоэлектрика магнониобата-титаната свинца $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT) с $x = 0,3$ (ромбоэдрическая фаза), полученных модифицированным методом Бриджмена.

Исследуемые образцы представляли собой пластины площадью 40×40 мм², толщиной 0,5 мм, вырезанные перпендикулярно направлению [001]. Статическая доменная структура была визуализирована взаимодополняющими методами высокого разрешения: сканирующей микроскопией пьезоэлектрического отклика (СМПО), сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) и конфокальной микроскопией комбинационного рассеяния (КМКР). Установлено, что механохимическая полировка PMN-PT приводит к слабому селективному травлению доменной структуры.

Показано, что исходная доменная структура образцов состоит из полосовых доменов с характерной шириной 2-5 мкм. Для ориентации доменов образец предварительно отжигался при температуре 240°C в течение 30 мин, а затем охлаждался до комнатной температуры со скоростью 0,8°C/мин в поле 100 В/мм, приложенном в направлении [001]. В качестве электродов использовалась серебряная паста. Показано, что в результате происходит существенная перестройка исходной структуры.

Проведено переключение поляризации PMN-PT прямоугольными импульсами с амплитудой от 85 до 170 В/мм с использованием жидких электродов (насыщенный водный раствор LiCl). При этом кинетика доменной структуры была визуализирована с помощью оптической микроскопии, что позволило выявить основные стадии ее эволюции в процессе переключения. Установлено, что процесс переключения поляризации представляет собой рост игловидных доменов от края электрода. Токи переключения были проанализированы с помощью модифицированного подхода Колмогорова-Аврами с учетом геометрической катастрофы [1,2]. Показано, что полевая зависимость характерного времени процесса изменяется активационному закону с полем активации

1040 ± 50 В/мм.

Исследование выполнено с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (постановление 211, контракт 02.А03.21.0006), а также государственного задания Министерства науки и образования Российской Федерации (проект 1366.2014/236).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shur V. Ya., Romyantsev E. L., and Makarov S. D., J. Appl. Phys. **84**, 445 (1998).
Shur V. Ya., Romyantsev E. L., Shishkina E. V., Ferroelectrics 1, 443 (2013)

Регулярная доменная структура в ниобате лития, созданная облучением электронным пучком

**Чезганов Д.С.^{1,2}, Власов Е.О.¹, Ахматханов А.Р.^{1,2}, Кузнецов Д.К.¹,
Чувакова М.А.¹, Шур В.Я.^{1,2}**

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: chezganov.dmitry@urfu.ru)*

²*ООО «Лабфер», Екатеринбург, 620014, Россия*

Нами проведено экспериментальное и путем компьютерного моделирования исследование формирования регулярной доменной структуры (РДС) при облучении электронным пучком кристаллов ниобата лития, легированного MgO [1-4]. В результате созданы регулярные доменные структуры и продемонстрирована генерация второй гармоники (ГВГ) зеленого света.

Исследуемые образцы представляли собой пластины конгруэнтного LN, легированного 5 моль% MgO, вырезанные перпендикулярно полярной оси, толщиной 1 мм. Облучаемая Z- полярная поверхность была покрыта слоем резиста толщиной 2,5 мкм. На противоположную поверхность наносился сплошной металлический электрод. Облучение проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа Auriga Crossbeam (Carl Zeiss), оснащенного системой электронно-лучевой литографии Elphy Multibeam (Raith). Использовались точечное и полосовое экспонирование с различными периодами и дозами. Доменная структура была визуализирована после селективного химического травления методами оптической микроскопии.

Измерены зависимости размеров изолированных и полосовых доменов от дозы и периода РДС. Было показано, что качество РДС зависит от толщины резиста и энергии электронов. Показано, что наличие слоя резиста является ключевым фактором для создания РДС. Определены оптимальные параметры облучения.

С помощью компьютерного моделирования было изучено формирование пространственного заряда и распределение электрического поля. Показано, что локализация пространственного заряда в слое резиста вблизи границы с LN приводит к возникновению максимального поля на границе и формированию РДС лучшего качества. Механизм образования и роста доменов под действием поля, создаваемого пространственным зарядом, объяснен в рамках кинетического подхода [5].

Полученные данные были использованы для формирования регулярной доменной структуры площадью 1x5 мм² и периодом 6,89 мкм в пластинах толщиной 1 мм. Была продемонстрирована ГВГ зеленого света. Высокая однородность периодической структуры была подтверждена достигнутой эффективностью ГВГ.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ, при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-8441.2016.2) и Правительства Российской Федерации (постановление 211, контракт 02.A03.21.0006).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shur V.Ya., Chezganov D.S., et al., Appl. Phys. Lett. **106**, 232902 (2015).
2. Chezganov D.S., et al., Ferroelectrics **476**, 117 (2015).
3. Chezganov D.S., et al., Ferroelectrics **496**, 70 (2016).
4. Chezganov D.S., et al., Ferroelectrics **508** (2017) (в печати).
5. Shur V.Ya., J. Mater. Sci., **41**, 199 (2006).

Формирование дендритных доменных структур в ниобате лития

**Чувакова М.А., Есин А.А., Ахматханов А.Р., Чезганов Д. С.,
Зеленовский П. С., Шур В. Я.**

¹*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет
Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: M.A.Chuvakova@urfu.ru)*

Исследованы дендритные доменные структуры, образующиеся в монокристаллах конгруэнтного ниобата лития (CLN) с искусственным диэлектрическим слоем при переключении поляризации при повышенных температурах. Изучена полевая зависимость формы доменов.

Ранее нами было экспериментально изучено формирование изолированных дендритных доменов при переключении поляризации в конгруэнтном танталате лития и стехиометрическом ниобате лития при повышенных температурах ($T = 250-275^\circ\text{C}$) [1,2]. Полученные результаты были отнесены за счет формирования неконтролируемого поверхностного диэлектрического слоя.

В данной работе переключение поляризации производилось в том же диапазоне температур в пластинах CLN с контролируемым диэлектрическим слоем. Исследовались пластины CLN, вырезанные перпендикулярно полярной оси Z , с шероховатостью поверхности около 1 нм. На Z^+ полярную поверхность методом электронно-лучевого испарения был нанесен слой диэлектрика. Переключение производилось сплошными металлическими электродами. Прикладывались одиночные прямоугольные импульсы с амплитудой от 5 до 11 кВ/мм.

С помощью *in situ* визуализации с использованием оптической микроскопии был выявлен аномальный сценарий роста дендритных доменов. Выявлены процессы расщепления и ветвления доменных лучей. Определена немонотонная зависимость скорости роста ветвей от времени. Выделены основные стадии формирования дендритного домена. Измерена полевая зависимость формы доменов.

Наблюдение с высоким пространственным разрешением полученных статических доменных структур, выявленных селективным химическим травлением, с помощью сканирующей электронной микроскопии позволило измерить геометрические параметры дендритов. Визуализация доменной структуры в объеме с помощью конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния была использована для измерения глубины дендритных доменов. Следует отметить, что форма дендритных доменов соответствует симметрии кристалла и практически совпадает с формой классических дендритных кристаллов, образующихся при кристаллизации из расплава [3].

В работе использовалось оборудование Уральского центра коллективного пользования “Современные Нанотехнологии” УрФУ. Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант 14-12-00826).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shur V.Ya., Chezganov D.S., Nebogatikov M.S., Baturin I.S., Neradovskiy M.M., J. Appl. Phys. **112**, 10 (2012).
2. Shur V.Ya., Akhmatkhanov A.R., Chezganov D.S., Lobov A.I., Baturin I.S., Smirnov M.M., Appl. Phys. Lett. **103**, 242903 (2013).
3. Kobayashi R., Phys. D Nonlinear Phenom. **63**, 410 (1993).

Анализ спонтанной эволюции доменной структуры вблизи T_C с использованием пространственно- временных корреляционных функций

Голицына О.М., Дрождин С.Н., Чулакова В.О.

Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Россия
(E-mail: sndrozhdin@mail.ru)

Спонтанная эволюция доменной структуры на примере кристаллов чистого ТГС, ТГС с примесными (молекулы L, α -аланина, ионы хрома и фосфора) и радиационными (рентгеновское облучение) дефектами исследована с применением пространственно-временных корреляционных функций. Эти функции $C(\mathbf{r}, t) = \langle S(\mathbf{r}, t)S(0, t) \rangle$ представляют собой усредненные по всему ансамблю доменов произведения значений $S(\mathbf{r}, t)$ для двух фрагментов доменной картины, сдвинутых друг относительно друга на единицу масштаба \mathbf{r} . $S(\mathbf{r}, t)$ - это «параметр порядка», принимающий значения +1 или -1 для доменов с противоположным направлением вектора спонтанной поляризации. Функции $C(\mathbf{r}, t)$ демонстрируют, с одной стороны, степень сходства между указанными фрагментами доменной картины в данный момент времени, а с другой стороны, сходство одного и того же фрагмента с самим собой в различные моменты времени.

Исследовалась эволюция доменной структуры, возникающей в кристаллах ТГС после их выдержки в парафазе и последующего быстрого перевода в сегнетоэлектрическую фазу. Доменные картины были получены с помощью атомного силового микроскопа Solver P47 Pro с использованием кантилеверов NSG11/TiN в контактном режиме пьезоэлектрического отклика.

Применение статистического анализа позволило рассчитать характеристики доменной структуры исследованных кристаллов и описать её эволюцию при температурах $\Delta T_C \leq T_C - 4$ К, т.е. вблизи точки Кюри $T_C = 322$ К. Ключевым интересом к указанной температурой области связан с тем, что эволюция доменной структуры исследованных кристаллов вблизи точки фазового перехода происходит в условиях ее сильной неравновесности и при наличии значительных флуктуаций спонтанной поляризации.

Показано, что:

- эволюция доменной структуры для всех исследованных кристаллов одинакова: происходит ее укрупнение, являющееся в легированных и облученных кристаллах менее интенсивным по сравнению с номинально чистым ТГС [1] вследствие влияния дефектов, стопорящих доменные стенки в процессе их спонтанного движения;
- удаление от T_C приводит к преобладанию бокового движения доменных стенок (в направлении [001]) над менее выраженным развитием доменов в ортогональном к [001] направлении;
- временные зависимости характеристической длины [1] исследованных доменных структур описываются растущей степенной функцией, что, вероятно, является универсальным законом поведения доменных конфигураций разной природы [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. V. Likodimos, M. Labardi, M. Allegrini, Phys. Rev. B, 2002, **66**, p.024104.
2. Bray A.J. // Advances in Physics, 1994, vol. 43, p. 357-459.

Исследование контактных явлений на границе раздела PZT-Pt методом наведенного тока

Антонович А.Н., Лапин Д.Г., Петрушин А.А., Подгорный Ю.В.

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454, Россия
(E-mail: box2015.f@yandex.ru)

Структуры на основе сегнетоэлектрических тонких пленок являются перспективной средой для создания новых типов устройств обработки и хранения информации, в т.ч. энергонезависимых запоминающих устройств, устройств микромеханики и пр. [1]. Многие физические модели, описывающие процессы транспорта носителей заряда, процессы зарядовой релаксации и пр., предполагают существование на границе раздела сегнетоэлектрик-металл выпрямляющего контакта в виде барьера Шоттки или р-п перехода [2]. В настоящей работе впервые для прямой регистрации областей пространственного заряда (ОПЗ) вблизи границы раздела PZT/Pt использован метод наведенного тока (electron beam induced current EBIC), основанный на локальном сканировании структуры электронным пучком с энергией, достаточной для генерации неравновесных электронно-дырочных пар [3]. Неравновесные носители заряда диффундируют внутри образца, и часть из них достигает границы области пространственного заряда (ОПЗ) коллектора [4]. Электрическое поле внутри ОПЗ разделяет электронно-дырочные пары, что приводит к появлению тока во внешней цепи. Таким образом, основными экспериментальными результатами данного метода являются значения наведенного тока в каждой точке зондирования.

В работе исследованы тонкие пленки плотной и пористой керамики PZT ($\text{PbZr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48}\text{O}_3$) толщиной ~1100 нм, сформированные методом химического осаждения на подложках монокристаллического кремния со структурой Pt (150 нм) – TiO_2 (10 нм) – SiO_2 (300 нм) – Si. Образец сканировали электронным зондом с энергией 30 кэВ и током 48 нА параллельно предполагаемой барьерной структуре. При этом фиксировали значение тока в цепи и получали его распределение по всей области сканирования. Эксперимент проводили при различных напряжениях внешнего смещения на структуре. Установлено, что ОПЗ растет при увеличении напряжения смещения одной из полярностей (рис.1). Численные оценки показывают корреляцию полученных результатов с предполагаемой концентрацией кислородных вакансий.

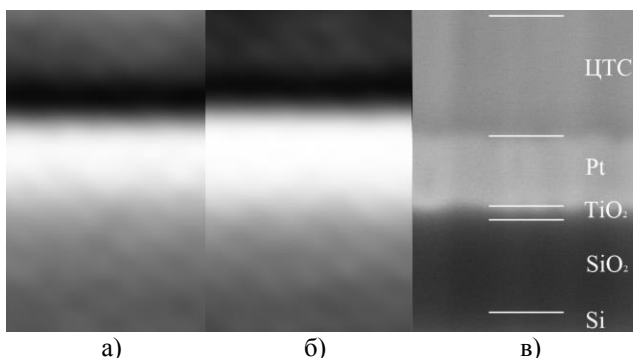


Рис. 1. ОПЗ (область белого цвета) на интерфейсе PZT-Pt, полученная при различных напряжениях смещения методом наведенного тока: а) 2В, б) 5В, в) вертикальный срез исследуемой структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства, М.: Энергоатомиздат, 2011.
2. Подгорный Ю.В., Воротилов К.А., Сигов А.С. ФТТ 54, 859 (2012).
3. Paul M., Heayoung P., Nikolai B. Sol. Energy Mat. and Solar Cells, 116 (2013).
4. Inns D. Thin Solid Films 515, 3806 (2007).

Формирование и свойства пленочных нанокompозитов сегнетоэлектрик-полимер

**Афанасьев В.П., Еланская К.Г., Мухин Н.В., Соколова И.М.,
Чигирев Д.А.**

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
Санкт-Петербург, 197376, Россия (E-mail: VPAfanasjev@mail.ru)*

Синтез новых полимерных композитов с сегнетоэлектрическими наполнителями и изучение их свойств являются актуальными из-за растущего практического применения этих материалов в различных областях техники. Выбор метода изготовления композита на базе системы диэлектрическая матрица/нанодисперсный сегнетоэлектрический наполнитель позволяет в значительной степени исключить неопределенность в структуре, размере зерна вводимой сегнетоэлектрической фазы. С другой стороны, изменяя свойства матрицы, можно в достаточно широких пределах изменять параметры и функциональное назначение создаваемых композитов.

Объектом исследования являлись пленки органо-неорганического композита с сегнетоэлектрическим наполнителем – порошком керамики ЦТСНВ-1 состава $Pb_{0,81}Sr_{0,04}Na_{0,075}Bi_{0,075}(Zr_{0,58}Ti_{0,42})O_3$ в полимерной матрице поли(бензоксазола).

Цель работы – исследование электрофизических параметров композитной пленки, а также ее компонентов в широком диапазоне частот: 1кГц...1,5ГГц и при различных температурах.

Была разработана технология получения и исследованы характеристики пленочных термостойких композитов системы ЦТСНВ-1 / поли(бензоксазол). Установлены основные параметры процесса диспергирования сегнетоэлектрического порошка: мощность ультразвукового сигнала, выбор среды диспергирования, подбор массы порошка, время проведения процесса. Достигнутые значения минимальной дисперсности частиц порошка составили 200...300 нм. Выявлены корреляционные закономерности между временем осаждения и степенью загрузки композита, между вязкостью суспензии и скоростью осаждения частиц наполнителя, между временем декантации и степенью агломерации частиц наполнителя.

Разработанная технология обеспечивает, в зависимости от комбинации используемых технологических факторов, возможность получения пленочных композитов ЦТСНВ-1/ поли(бензоксазол) со следующими параметрами: размер зерна от 200нм до 1 мкм; толщина покрытия от 2 до 20 мкм; эффективная диэлектрическая проницаемость композита от 50 до 200; удельная емкость от 5000 до 11000 пФ/см².

Исследованы электрофизические параметры образцов пленочного композита и его компонентов в интервале частот от 1 кГц до 1,5 ГГц и диапазоне температур от 0 до 200°С. На частотных спектрах пленочного композита в отличие от спектров для полимера и керамики обнаружены два максимума, отражающих наличие двух релаксационных процессов в высокочастотной области. Выдвигается предположение, что их появление связано с различиями в параметрах релаксационных процессов, развивающихся в объеме сегнетоэлектрического зерна и на его периферии. Отмечены высокая стабильность емкости конденсаторных структур с пленочным композитом в качестве диэлектрика в интервале температур от 0 до 200 °С при всех частотах измерения.

Полученный материал можно использовать для создания встроенных пленочных конденсаторов в электронике.

Работа поддержана в рамках госзадания Минобрнауки РФ, заявка №3.3990.2017/П4.

Эпитаксиальные пленки $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ и $BiFeO_3$ на монокристаллических подложках (111) MgO

Бунина О.А.¹, Головки Ю.И.², Мухортов В.М.²

¹НИИ Физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, 344090, Россия
(E-mail: obunina@gmail.com)

²Южный Научный центр РАН, 344006, Ростов-на-Дону, Россия

Пленки феррита висмута $BiFeO_3$ (BFO) и титаната бария-стронция $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ (BST) на монокристаллических подложках (111) MgO получены методом ВЧ распыления стехиометрических керамических мишеней. Как и при напылении на поверхность (100) MgO , эпитаксиальные пленки феррита висмута на (111) MgO удалось получить только при использовании промежуточного слоя титаната бария-стронция, напыленного непосредственно на подложку. В процессе напыления BFO на промежуточный слой BST (111) MgO получено новое структурное (ромбоэдрическое) состояние слоев обоих составов, не реализующееся как в объемном образце, так и в пленках того же состава на (001) поверхности монокристаллов MgO .

Определение структурного состояния пленок BST/BFO/(111) MgO и анализ возникающих при эпитаксиальном росте структурных искажений проведено на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием фокусировки в параллельном пучке $Cu\ K\alpha_1$ с $Ge(220)$ монохроматором на первичном пучке.

На первом этапе проводился анализ структурных характеристик двух однослойных пленок BST толщиной 100 и 200 нм (BST100 и BST200). После завершения сбора данных поверх слоев BST напылялись слои феррита висмута толщиной 100 и 150 нм соответственно (BST/BFO100/100 и BST/BFO200/150). Совместный анализ рентгенограмм $2\theta-\omega$ и φ - сканирования асимметричных рефлексов во всех случаях с очевидностью указывал на эпитаксиальный рост с соотношениями [111] пленки || [110] MgO и [111] пленки || [110] MgO . Параметры решетки в плоскости подложки устанавливались с использованием метода скользящего падения пучка под углом 0.2 град.

Однослойные пленки BST испытывают деформации объемного сжатия, при котором пленка сжата вдоль поверхности подложки и растянута в азимутальном направлении с относительными продольными деформациями

BST100: $U_{xx} = -7.3\%$ $U_{zz} = 2.1\%$

BST200: $U_{xx} = -8.7\%$ $U_{zz} = 1.8\%$

После напыления верхнего слоя феррита висмута в слоях BST устанавливаются одинаковые (равновесные) значения деформаций $U_{xx} = -13\%$ и $U_{zz} = 2.5\%$. При этом обеспечивается эпитаксиальный рост слоев феррита висмута, при котором *in-plane* параметры решетки обоих слоев совпадают. Слои BFO испытывают деформации сжатия как в плоскости подложки, так и в азимутальном направлении:

В пленке BST/BFO 100/100 для слоя BFO $U_{xx} = -3.0\%$ $U_{zz} = -2.5\%$

В пленке BST/BFO 200/150 для слоя BFO $U_{xx} = -2.5\%$ $U_{zz} = -2.7\%$

Работа выполнена при поддержке Проектной части Госзадания Минобрнауки № 3.1649.2017/ПЧ (ПЧ0110-11/2017-14).

Полярные свойства наночастиц гидроксиапатита

Быстрова А.В.^{1,2}, Дехтяр Ю.Д.²

¹Институт математических проблем биологии, ФИЦ ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Пущино, 142290, Россия (E-mail: bystrova@physics.msu.ru)

²Институт биомедицинской инженерии и нанотехнологий, Рижский технический университет, Рига, LV-1658, Латвия

Исследование применений гидроксиапатита (ГАП) в качестве покрытий для биоимплантов показало, что наиболее качественные импланты формируются при наличии на их поверхности слоя ГАП имеющего электрический заряд (поляризацию) и чаще с отрицательным знаком на внешней поверхности. Это приводит к активному движению живых остео-клеток, которые сами имеют свои электрические заряды и приобретают в электрическом поле от заряженной поверхности индуцированные дипольные моменты, что приводит к их более быстрой адгезии, росту и пролиферации. В результате клетки лучше приживаются и имплант интегрируется в организм с лучшим качеством.

Ранее было показано также, что ГАП существует в разных фазах и может иметь упорядоченную структуру с ориентированными дипольными моментами вдоль каналов ОН групп в структуре ГАП. В таком упорядоченной состоянии кластер ГАП имеет свой собственный дипольный момент и поляризации, аналогично сегнетоэлектрикам. При формировании керамики такие кластеры (или зерна) ГАП взаимно компенсируют свои дипольные моменты, так, что в целом керамика не имеет поляризации. Однако каждая ее наночастица может быть поляризована и это создает на поверхности ГАП области с распределенным электрическим зарядом, которые активно взаимодействуют с клеткой.

В данной работе методами компьютерного квантово-химического моделирования и расчетов показано формирование ориентированного внутреннего электрического поля и дипольных моментов в самых простых минимальных моделях ГАП наночастиц [1].

На Рис. 1 приведена модель минимального кластера ГАП, содержащего структуру ОН-канала в разных проекциях и профиль потенциала вдоль этого канала для случая вакансии водорода у одной из групп ОН. Полученный профиль показывает потенциальную энергию протона при его движении в асимметричном поле ориентированном по оси ОН-канала. Все расчеты выполнены квантово-химическим РМ3 методом в неограниченном приближении Хартри-Фока, используя программный пакет NucleonChem 8.01. Результаты сразу показывают наличие собственного дипольного момента, возникающего по оси ОН-канала. Работа поддержана грантом РФФИ № 15-01-04924.

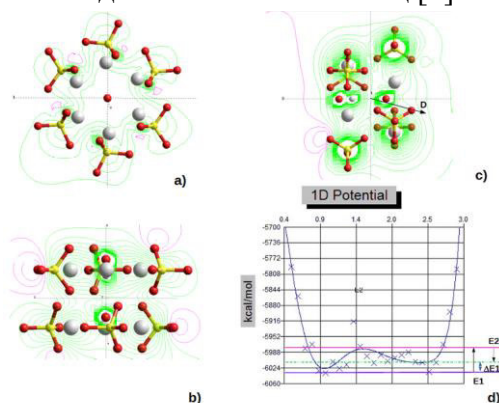


Рис. 1. Модель минимального кластера ГАП в разных проекциях: а) Z, б) Y, с) X; и профиль d) рассчитанного потенциала вдоль оси ОН-канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. V. S. Bystrov, E. Paramonova, Yu. Dekhtyar *et al.* J. Phys.: Condens. Matter., **23**, 065302 (2011).

Особенности сегнетоэлектрического состояния в двухслойных гетероструктурах на основе титаната бария-стронция

Головко Ю.И., Мухортов В.М., Бирюков С.В.

*Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, 344006, Россия
(E-mail: urgol@rambler.ru)*

Сегнетоэлектрические гетероструктуры, состоящие из слоев различного состава (многослойные и сверхрешетки), интенсивно исследуются с целью повышения диэлектрической проницаемости и ее термостабильности, понижения диэлектрических потерь и увеличение перестройки под действием внешнего электрического поля для задач микроэлектроники. Настоящее исследование направлено на поиски новых путей управления свойствами гетероструктур за счет деформации элементарной ячейки в тонкой пленке и интерфейсного влияния.

Создание двухслойных гетероструктур $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ($x=0.8$ (BST0.8) или $x=0.4$ (BST0.4)) на (001) срезах монокристаллов MgO проводилось с помощью разработанного нами метода высокочастотного распыления. Рост гетероструктур проводился по слоевому механизму Франка - Ван дер Мерве. Двухслойные гетероструктуры MgO+BST0.8+BST0.4 и MgO+BST0.4+BST0.8 (толщина каждого слоя меньше 70 нм) имеют полную параллельную ориентацию, как между слоями, так и относительно подложки. Прецизионные рентгенодифракционные исследования указывают на принципиальные различия кристаллографических характеристик пленок в зависимости от того, который из слоев BST0.4 или BST0.8 осаждался на подложку первым. Для двухслойной структуры MgO + BST0.8 + BST0.4 нижний слой BST0.8 и верхний слой BST0.4 имеют одинаковые параметры решетки $c=0.4001$ нм, $a=b=0.4006$ нм. Для двухслойной структуры MgO+BST0.4+BST0.8 слои имеют разные параметры решетки $c=0.3974$ нм, $a=b=0.3940$ для BST0.4 и $c=0.4066$ нм, $a=b=0.3989$ для BST0.8.

Исследование спектров КРС двух гетероструктур (MgO+BST0.8+BST0.4) и (MgO+BST0.4+BST0.8) показало, что в геометрии рассеяния $Y(XX)-Y$ наблюдается резкий сдвиг частоты $A_1(TO)$ мягкой моды от 245 до 295 cm^{-1} . Поскольку $A_1(TO)$ -компонента мягкой моды соответствует смещениям ионов Ti относительно кислородного октаэдра в направлении, перпендикулярном плоскости подложке, ее частота чувствительна к величине механических напряжений в гетероструктуре. Повышение частоты $A_1(TO)$ мягкой моды в гетероструктуре (MgO + BST0.4 + BST0.8), свидетельствует о наличии сжимающих напряжений в слоях BST0.4 и BST0.8, образующих эти гетероструктуру.

Для исследования диэлектрических характеристик эпитаксиальных пленок на их поверхность наносились планарные электроды методами контактной фотолитографии и ионно-лучевого распыления алюминия с подслоем ванадия. Установлено, что температура фазового перехода из параэлектрической в сегнетоэлектрическую фазу для гетероструктуры (MgO+BST0.4+BST0.8) на 120 градусов ниже, чем в (MgO+BST0.8+BST0.4). Диэлектрическая управляемость (изменение диэлектрической проницаемости под действием внешнего электрического поля) в структуре (MgO+BST0.8+BST0.4) в два раза выше, чем (MgO+BST0.4+BST0.8) при диэлектрических потерях на уровне 0.01.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы № 01201354247 и гранта РФФИ № 16-29-14013.

Релаксационные процессы в пленках ЦТС в постоянных электрических полях

Иванов В.В.¹, Голубева Е.Н.¹, Сергеева О.Н.¹, Пронин И.П.²

¹Тверской госуниверситет, Тверь 170100, Россия (E-mail: o_n_sergeeva@mail.ru)

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Россия

Нестабильность доменной структуры в коэрцитивных полях приводит к возникновению релаксационных явлений, сопровождающих процессы переполяризации [1]. В настоящей работе исследуются релаксационные процессы, возникающие в постоянных электрических полях при переполяризации пленок ЦТС толщиной 0,7 – 1 мкм, сформированных двухстадийным (*ex-situ*) методом ВЧ магнетронного распыления керамических мишеней $\text{Pb}(\text{Ti}_{0,54}\text{Zr}_{0,46})\text{O}_3 + 10\%$ мол. PbO на платинированные кремниевые и ситалловые подложки с последующим высокотемпературным отжигом на воздухе при $T_{\text{ann}} = 550\text{--}650\text{ }^\circ\text{C}$ для кристаллизации фазы перовскита. В качестве верхних электродов использовались платиновые контакты. Релаксация диэлектрической проницаемости измерялась с помощью измерителя иммитанса E7-20, а пирозлектрического отклика – динамическим методом при периодическом нагреве/охлаждении образца лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 0,63\text{ мкм}$, модулированным импульсами прямоугольной формы [2]. На рис. 1 представлены релаксационные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и пирозлектрического тока (б) пленок ЦТС в коэрцитивном поле.

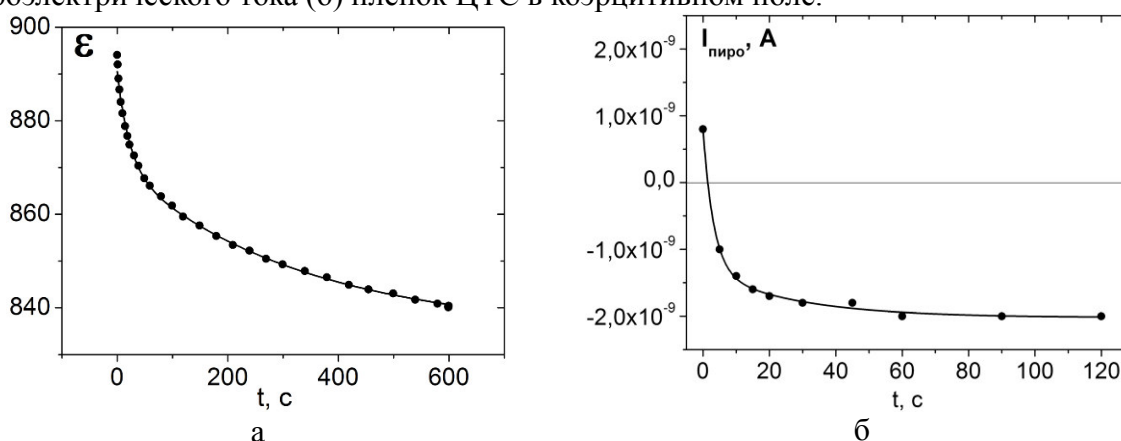


Рис. 1. Релаксационные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и пирозлектрического тока (б) пленки ЦТС при приложении постоянного поля в направлении самополяризации: точки – экспериментальные результаты; сплошная линия – аппроксимация суммой двух экспонент

В работе показано, что процесс переключения поляризации характеризуется двумя временами релаксации τ_1 и τ_2 , соответствующими зародышеобразованию и движению доменных границ, причем в направлении естественной униполярности процесс переполяризации происходит быстрее. Интересным на наш взгляд при исследовании диэлектрической релаксации в больших измерительных полях. является факт обнаружения скачкообразных импульсов, сопровождающих перестройку доменной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.М. Рудяк *Процессы переключения в нелинейных кристаллах* М.: Наука 1986. 248 с.
2. А.А. Богомолов, О.Н. Сергеева, Д.А. Киселев, Е.Ю. Каптелов, И.П. Пронин // Письма в ЖТФ. **31**. 11. (2005).

Влияние размерных эффектов на термодинамические свойства микро- и нанокерамики сегнетоэлектрика BaTiO_3

Бондарев В.С.^{1,2}, Горев М.В.^{1,2}, Карташев А.В.¹, Погорельцев Е.И.^{1,2}, Михалева Е.А.¹, Флёров И.Н.^{1,2}

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия (E-mail: vbondarev@yandex.ru)*

²*Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, 660036, Россия*

Одной из наиболее важных задач физики конденсированного состояния является получение информации о влиянии электрических полей разной физической природы на механизм фазовых переходов и энтропию твердых тел. К сожалению, часто, высокая напряженность электрических полей приводит к разрушению диэлектриков. Как показано недавно [1, 2], сильное влияние на величину поля пробоя материала оказывает размер частиц микро и нанокерамик. Исследование влияния размерного фактора, термической предыстории материалов и методов приготовления на электрофизические и термодинамические характеристики керамических образцов является актуальной задачей и с точки зрения нахождения оптимальных условий для повышения электрокалорической эффективности твердотельных хладагентов на основе микро и нанокерамических сегнетоэлектриков и мультислойных структур.

В настоящей работе представлены результаты исследований термодинамических свойств микро и нанокерамик сегнетоэлектрика BaTiO_3 , приготовленных методами электроимпульсного плазменного спекания (Spark Plasma Sintering) и твердофазного синтеза из соответствующих оксидов. Проведена характеристика составов и качества образцов, определены размеры зерен и их распределение в керамических образцах, а также выполнены исследования фазовых переходов методами рентгеновского дифрактометра, дифференциальной сканирующей микрокалориметрии, электронной микроскопии, адиабатической калориметрии, дилатометрии. Природа структурных искажений, вызванных фазовыми превращениями, изучена рентгеноструктурными и диэлектрическими методами.

Анализ полученных результатов совместно с данными других работ позволил установить наиболее важные критерии для повышения калорической эффективности керамических материалов на основе BaTiO_3 , перспективных для применения в качестве твердотельного хладагента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 16-42-240428 p_a.

ЛИТЕРАТУРА

1. Matjaz Valant, Anna - Karin Axelssonb, Florian Le Goupilb, Neil McN. Alford. *Materials Chemistry and Physics* **136**, 277-280 (2012).
2. Duk-Hee Kim, Woo-Sik Um, Ho-Gi Kim. *J. Mater. Res.*, Vol. **11**, No. 8, 2002 (1996).

Размерный эффект в нанокompозите на основе нитрита натрия внедренного в матрицу SBA-15 (3D)

Ефимова О.В., Стукова Е.В., Зотова О.В.

*Амурский государственный университет Благовещенск, 675027, Россия
(E-mail: xefimova@gmail.com)*

В настоящее время значительный интерес представляют исследования диэлектрических свойств нанокompозитов на основе пористых матриц с сегнетоэлектрическим компонентом. Свойства таких нанокompозитов могут существенно отличаться от свойств объемных материалов [1, 2].

В данной работе исследуются диэлектрические свойства нитрита натрия, внедренного в силикатные матрицы SBA-15 (3D) с размерами пор 9,4 нм. Внедрение нитрита натрия в поры проводилось из насыщенного водного раствора при непрерывном медленном нагревании до 120 °С. Затем из высушенного порошка под давлением 6000 кг/см² прессовался образец в виде таблетки с диаметром 12 мм и толщиной ~ 1мм. Измерения диэлектрической проницаемости проводились в режиме нагрев-охлаждение в температурном интервале от 20 °С до 200 °С со скоростью 1 градус/мин на частотах от 0,1 Гц до 1 МГц с помощью широкополосного диэлектрического спектрометра Novocontrol. В качестве электродов использовалась серебряная паста. Точность измерения температуры составляла 0,1 °С.

На температурных зависимостях ϵ' образца нанокompозита при нагревании и охлаждении на частоте 1 кГц (см. рис. 1.) наблюдается один максимум при температуре $T \approx 159$ °С, что на 4 градуса ниже по сравнению с температурой фазового перехода для объемного поликристаллического нитрита натрия. Для образца нанокompозита наблюдается существенная низкочастотная дисперсия (см. рис. 2.).

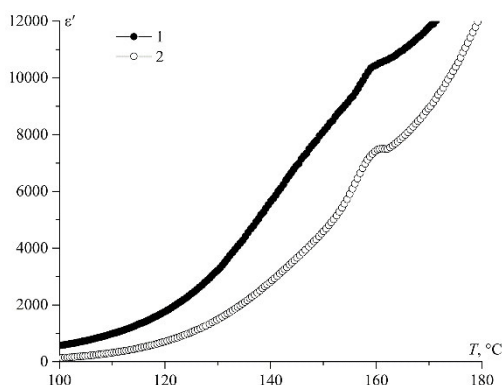


Рис. 1. Температурные зависимости ϵ' на частоте 1 кГц для нитрита натрия в силикатных матрицах SBA-15 (3D) при нагревании (1) и охлаждении (2)

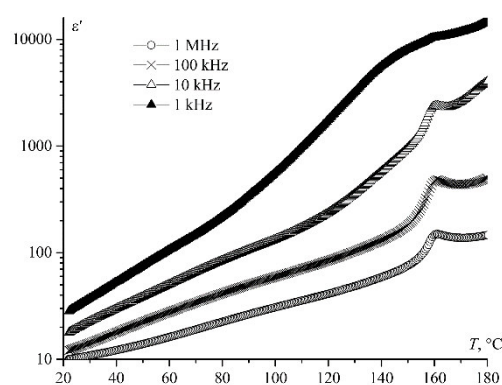


Рис. 2. Температурные зависимости ϵ' при нагревании на разных частотах для нитрита натрия в силикатных матрицах SBA-15 (3D)

ЛИТЕРАТУРА

1. Pan'kova S.V., Poborchii V.V., Solov'ev V.G. J. Phys.: Cond. Matter **8**, L 203 (1996).
2. Горчаков А.Г., Седых П.С., Чарная Е.В. и др., ФТТ **51**, 2028 (2009).

Вклад спонтанной поляризации в барьерные эффекты гетероструктур на основе тонких пленок PZT

Каменщиков М.В.¹, Солнышкин А.В.¹, Пронин И.П.²

¹Тверской государственный университет, Тверь, 170002, Россия
(E-mail: Mikhailkamenshchikov@yandex.ru)

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Санкт-Петербург, 194021, Россия

В последнее время сегнетоэлектрические пленки широко используются в микроэлектронике. Структуры на основе цирконата-титаната свинца (PZT) занимают одну из ведущих позиций среди материалов для пьезо- и пироэлектрических сенсоров, микроэлектромеханических устройств, СВЧ-приборов и пр. Однако некоторые свойства пленок PZT по сей день требуют дополнительного изучения. Данная работа посвящена исследованию барьерных эффектов, обусловленных наличием границы раздела сегнетоэлектрик-металл (PZT-Pt).

Объектами исследования в работе служили пленочные гетероструктуры Pt/PZT/Pt, сформированные на кремниевых подложках. Образцы были изготовлены в ФТИ им. А.Ф. Иоффе двухступенчатым методом ВЧ магнетронного распыления. Слой PZT осаждался при 10% избытке оксида свинца, далее осуществлялся постростовой отжиг образцов при $T_{\text{синт}} = 540\text{--}570^\circ\text{C}$. На свободную поверхность пленки наносились платиновые электроды. Толщина слоя PZT – 500 нм. Исследование проводилось с помощью методов вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ).

В работе произведен расчет величины потенциального барьера (ϕ_b) на интерфейсе Pt/PZT на основе экспериментальных данных ВАХ и ВФХ согласно методикам [1–3].

Полученные из ВФХ значения ϕ_b варьировались в пределах от 0,5 до 1,5 эВ. Следует отметить, что величина ϕ_b существенно зависит от температуры синтеза пленок. В интервале исследованных температур синтеза ($540\text{--}570^\circ\text{C}$) наблюдается максимум при $T_{\text{синт}} = 555^\circ\text{C}$. Значения ϕ_b определенные из ВАХ изменялись в пределах от 0,1 до 0,3 эВ без однозначной закономерности от температуры синтеза пленок PZT. Данное несоответствие, по всей видимости, связано с тем, что расчет по ВАХ был произведен в рамках модели металл-полупроводник, где не была учтена спонтанная поляризация сегнетоэлектрика. В данной работе на основе модели, предложенной в работе [2], при определении величины потенциального барьера спонтанная поляризация сегнетоэлектрика учтена в виде дополнительного слагаемого согласно следующему соотношению:

$$\phi_{b, \text{ист}} = \phi_b + \sqrt{eP_S / 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \epsilon_{st}}, \quad (1)$$

где $\phi_{b, \text{ист}}$ – «истинная» величина потенциального барьера, ϕ_b – величина потенциального барьера, определенная из вольт-амперных характеристик, e – элементарный заряд, P_S – спонтанная поляризация, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, ϵ_r и ϵ_{st} – оптическая и статическая диэлектрические проницаемости. Исходя из этого, вклад поляризационного слагаемого в высоту потенциального барьера оценен примерно в 0,4 эВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00420 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родерик Э. Х. *Контакты металл-полупроводник* – М.: Радио и связь, 1982. – 208 с.
2. Pintilie L., Vrejoiu I., Hesse D. at al., Phys. Rev. B **75**, 104103 (2007).
3. Park B. H., Hyun S. J., Moon C. R. at al., J. Appl. Phys. **84**, 4428 (1998).

Электрофизические и пьезоэлектрические характеристики пленок $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$

**Киселев Д.А.^{1,2}, Афанасьев М.С.¹, Левашов С.А.¹, Сивов А.А.¹,
Чучева Г.В.¹**

¹Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 141190 Фрязино, Пл. Введенского 1, Россия

²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049 Москва, Ленинский проспект 4, Россия
(E-mail: dm.kiselev@gmail.com)

В последнее время интенсивно исследуются диэлектрические, сегнето- и пьезоэлектрические свойства тонких пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST), как модельного бессвинцового материала [1,2]. Одним из перспективных направлений применения сегнетоэлектрических тонких пленок в микро- и нанoeлектронике являются энергонезависимые элементы памяти, в которых обеспечивается эффект переключения поляризации.

В настоящей работе приводятся результаты электрических и пьезоэлектрических свойств сегнетоэлектрических тонких пленок $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ (BST 80/20) в зависимости от толщины сегнетоэлектрического слоя. BST 80/20 тонкие пленки различной толщины от 150 нм до 550 нм, синтезировались с помощью высокочастотного реактивного распыления керамической мишени в атмосфере кислорода на Si подложки p- и n-типа с кристаллографической ориентацией [100]. Омические контакты формировались электронно-лучевым методом через теневую маску. В качестве материала омического контакта использовалось золото, обладающее наилучшей адгезией к пленке. Исследования электрофизических свойств структур проводились на экспериментальном стенде, состоящем из LCR-метра Agilent E4980A, персонального компьютера и камеры для крепления образца, и предназначенном для измерения емкости, полной проводимости и тангенс угла диэлектрических потерь. Ширина петли и эффективная диэлектрическая проницаемость BST пленки в Au/BST/Si конденсаторной структуре возрастает с увеличением толщины пленки. Доменная структура, переключение поляризации и петли пьезоэлектрического гистерезиса пленок BST 80/20 были исследованы с помощью силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика на сканирующем зондовом микроскопе MFP-3D Asylum Research (США) с использованием проводящего кантилевера Asytec-01. Экспериментально показано, что эффективный пьезоэлектрический коэффициент (d_{33}) и величина остаточного пьезоэлектрического отклика (ΔPR) BST 80/20 пленок увеличиваются с ростом толщины пленки. Заполяризованные постоянным напряжением области демонстрируют стабильность во времени. Полученные результаты указывают на то, что тонкие пленки BST являются перспективными материалами для использования их в качестве элементов энергонезависимой памяти на основе сегнетоэлектрического материала.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-07-00665 и 16-07-00666).

ЛИТЕРАТУРА

1. Bagdzevicius S. *et.al.* Appl. Phys. Lett. **108**, 132901 (2016).
2. Kiselev D.A. *et.al.* Thin Solid Films **619**, 214 (2016).

СВЧ фотонные кристаллы на основе гетероструктуры $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3/\text{MgO}$

Масычев С.И.¹, Мухортов В.М.¹

¹Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, 344006, Россия
(E-mail: simasychev@rambler.ru)

Представлены результаты исследования нескольких конструкций фотонных кристаллов (ФК) СВЧ-диапазона на основе гетероструктуры $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3/\text{MgO}$. Топология одной из конструкций приведена на рис.1. Общим свойством всех предложенных конструкций является возможность эффективного управления амплитудными и фазовыми характеристиками ФК с помощью напряжения смещения, приложенного к пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ наноразмерной толщины, что доказано как теоретически, так и экспериментально.

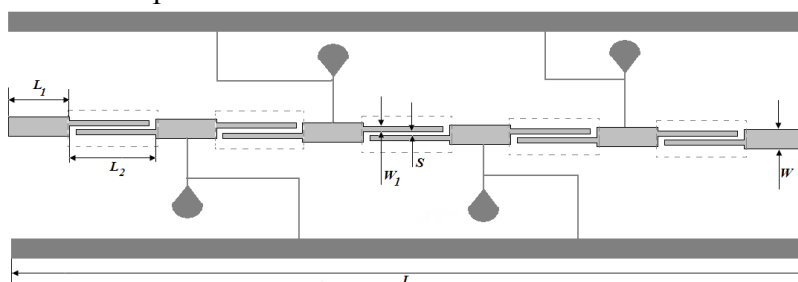


Рис. 1 ФК на гетероструктуре $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3/\text{MgO}$

В частности, рассмотрены особенности поведения фазы коэффициента передачи ФК S_{21} в пределах фотонных запрещенных зон (ФЗЗ) и в полосах прозрачности (рис.2). Показано, что внутри ФЗЗ фаза S_{21} остается неизменной как при наличии напряжения смещения, так и при его отсутствии.

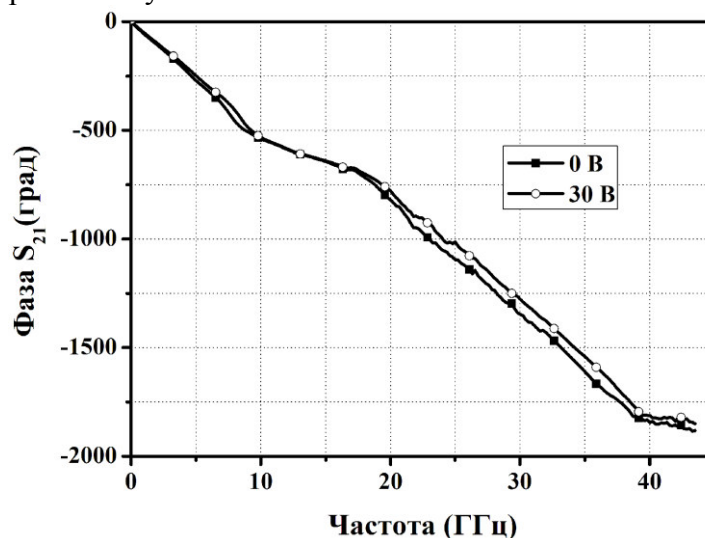


Рис. 2. Зависимость фазы S_{21} от напряжения смещения

Работа выполнена при финансовой поддержке по теме № 01201354247 и гранта РФФИ № 16 -29-14013.

Сегнетоэлектрические пленки и гетероструктуры, полученные экстракционно-пиролитическим методом

Патрушева Т.Н., Семенова О.В., Слизкова А.В., Раилко М.Ю.

*Сибирский федеральный университет Красноярск, 660041, Россия
(E-mail: pat55@mail.ru)*

Свойства тонких пленок сегнетоэлектриков находятся в сильной зависимости от их структуры (размера зерен, степени пористости, границ раздела), которые определяются условиями синтеза. Нами предложен метод получения сегнетоэлектрических пленок из растворов экстрактов [1], который снижает температурные параметры синтеза пленок.

Рентгенофазовый анализ продуктов пиролиза экстрактов при различных температурах показал, что монофазные пленки BaTiO_3 формируются при 550°C в аморфно-кристаллическом состоянии. Повышение температуры отжига приводит к усилению кристалличности продукта, о чем свидетельствует рост интенсивности пиков при $30\text{ 2}\theta$. Для формирования фазы сложного оксида проводился высокотемпературный отжиг при температурах $500\text{--}700^\circ\text{C}$. При этом следует учесть, что твердофазный синтез титанатов бария и стронция из простых оксидов происходит при температурах 1300°C . Разрабатываемый метод обеспечивает и снижение температуры синтеза и чистоту получаемых сложных оксидов.

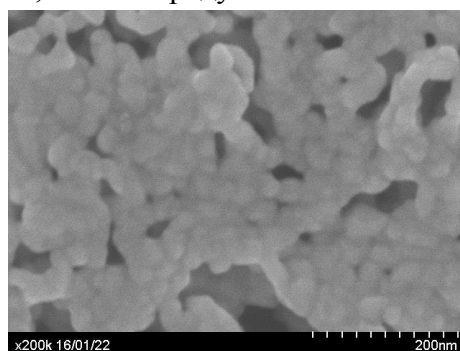
Однако, даже высокие температуры отжига не приводят к значительному росту размера частиц, о чем свидетельствуют уширенные пики, то есть продукт остается нанокристаллическим.

Пленки BaTiO_3 были получены в нанокристаллическом состоянии и отжиг при $600\text{--}800^\circ\text{C}$ не привел к увеличению размера зерен.

Измерения физических параметров пленок показали наличие квадратной петли гистерезиса и высокие значения диэлектрических констант.

Пленки титаната бария, а также титанатов бария-стронция были использованы для создания гетероструктурных систем «пористый кремний-сегнетоэлектрик» с высокими значениями диэлектрической проницаемости. Низкочастотная диэлектрическая проницаемость исследованных структур в целом демонстрирует сравнительно слабую температурную зависимость в интервале температур от 20 до 120°C с незначительным максимумом при фазовом переходе, а абсолютные значения ϵ при этом сохраняют высокие значения, что может быть полезным для практики.

Пленки титаната бария были использованы для повышения эффекта светособирания и снижения рекомбинационных потерь в солнечных ячейках Гретцеля, изготовленных на стекле нанесением пленок экстракционно-пиролитическим методом.



ЛИТЕРАТУРА

1. Холькин, А. И. Патрушева Т. Н. Экстракционно-пиролитический метод. Получение оксидных функциональных материалов М.: КомКнига, 2006. – 187 с.
2. Патрушева Т.Н. Технологии изготовления компонентов оксидных солнечных батарей. Монография. Изд. СФУ: Красноярск. 2015 – 328 с.
3. Froncombe M.N. Phys. Thin. Films: Adv. Res. and Dev. **17** 225 (1993).

Исследование влияния объема на поверхность сегнетоэлектрических систем

Петрова Т.О.¹, Максимова О.Г.², Герасимов Р.А.¹, Баруздина О.С.²,
Максимов А.В.²

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006, Россия
(E-mail: to_87@bk.ru)

²Череповецкий государственный университет, Череповец, 162600, Россия

Физические явления, происходящие в сегнетоэлектрических тонких пленках, значительно отличаются от переходов в объемных сегнетоэлектриках, поэтому сегнетоэлектричество в конечных объектах является очень чувствительным к граничным условиям [1-3]. Особую значимость имеет возможность практического применения сверхтонких сегнетоэлектрических пленок в электронных устройствах [4]. Таким образом, актуальной задачей является исследование поверхности сегнетоэлектрических систем.

В данной работе для описания поверхности сегнетоэлектрических полимерных систем применялась двумерная модель, представляющая собой систему из свободносочлененных цепей, каждая из которых является последовательностью шарнирно соединенных жестких сегментов, расположенных параллельно [5]. Параметр порядка определялся, как средний косинус угла между направлением директора и мгновенным направлением оси молекулы $\mu = \langle \cos \varphi_{n,m} \rangle$, при этом учтено взаимодействие выбранной молекулы поверхности с остальными молекулами вещества, находящимися в объеме. Поскольку влияние молекул вещества различно, то было введено среднее поле, а также такие характеристики системы, как персистентная длина и параметр межцепного взаимодействия. В подобных двумерных системах в одном монослое отсутствует дальний ориентационный порядок. Получены формулы для расчета свободной энергии для двумерной системы, находящейся на поверхности.

В данной работе доказано, что на поверхности существует дальний ориентационный порядок, значение которого в критической точке меняется скачком до нуля, что говорит о существовании фазового перехода первого рода. Получены теоретические формулы для определения параметра порядка. Исследовано влияние персистентной длины, параметра межцепного взаимодействия и среднего поля на параметр дальнего порядка.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ «Методы микроструктурного нелинейного анализа, волновой динамики и механики композитов в исследовании и дизайне современных метаматериалов и элементов конструкций на их основе» (№ 15-19-10008).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 496 с. (2006).
2. Vaz S.A.F., Bland J.A.C., Lauhoff G. Magnetism in ultrathin film structures. Rep.Prog.Phys.**71** (2008).
3. J.Paul, T. Nishimatsu, Y. Kawazoe and U.V.Waghmare. Ferroelectric Phase Transitions in Ultrathin Films of BaTiO₃. Phys. Rev. Lett., **99.077601/1-4** (2007).
4. Воротилов К.А., Сигов А.С. Сегнетоэлектрические запоминающие устройства. М.: Материалы XIX Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков. (2011).
5. Грищенко А.Е., Черкасов А.Н. Ориентационный порядок в поверхностных слоях полимерных материалов. Успехи физических наук. **167** 269 (1997).

Моделирование стационарного тока утечки структур с тонкими сегнетоэлектрическими пленками ЦТС

Подгорный Ю.В., Воротилов К.А., Сигов А.С.

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454, Россия,
(E-mail: podgsom_2004@mail.ru)

Предметом исследования являются пленки $Pb(Zr_{0.48}Ti_{0.52})O_3$ на подложках Si-SiO₂-TiO₂-Pt, сформированные методом золь-гель [1]. При моделировании стационарного тока утечки использовалось уравнение, $V(I) = \eta\phi_T \cdot \ln(I/I_0 + 1) + k_b \cdot I^n$ которое при $n = 1$ представляет ВАХ полупроводникового диода с p-n переходом. Уравнение модифицировано – член, отражающий падение напряжения на объеме пленки (базе диода), представлен в виде степенной зависимости. Показатель n учитывает нелинейность сопротивления базы.

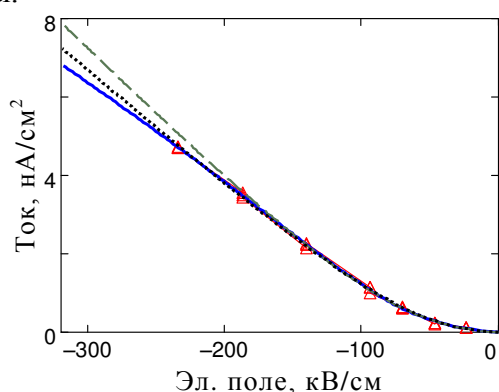


Рис. 1. J - E характеристики структуры с пленкой ЦТС 1165 нм

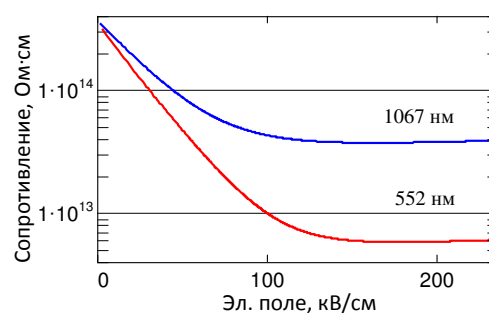


Рис. 2. Дифференциальное сопротивление структур

Результаты аппроксимации стационарного тока утечки диодным ($n = 1$) и модифицированным уравнениями показаны на рис. 1. Штриховая и пунктирная линии представляют аппроксимацию диодным уравнением в диапазоне до 140 кВ/см и 250 кВ/см соответственно. Сплошная линия соответствует аппроксимации с учетом нелинейности базы ($n \approx 1,33$) в диапазонах 185 и 240 кВ/см, где моделирующие параметры практически идентичны. В таблице приведены параметры функций, моделирующих ВАХ структур с пленками ЦТС толщиной 552 и 1067 нм. $\rho_{d \min}$ – минимальное значение дифференциального сопротивления.

Выводы. а) Значения плотности тока насыщения J_0 и параметра $\eta\phi_T$ в пределах погрешности измерения не зависят от толщины пленки, т.е. действительно отражают электрические характеристики интерфейсных слоев МСМ структур с учетом того, что сопротивление базы пленок разной толщины отличается практически на порядок, см. таблицу. б) Введение в моделирующую функцию степенной зависимости падения напряжения на объеме пленки от протекающего тока обеспечивает достоверное моделирование ВАХ в широком диапазоне действующего поля.

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке Минобрнауки России, проект 3.5726.2017/БЧ.

Основные параметры ВАХ						
d	$N\phi$	n	$\eta\phi_T$	k_b	J_0	$\rho_{d \min}$
нм			В		нА/см²	Ом·см
1067	1	1,33	2,4	$187 \cdot 10^9$	0,04	$37 \cdot 10^{12}$
1067	2	1,37	3,2	$146 \cdot 10^9$	0,08	$38 \cdot 10^{12}$
552	1	1,38	1,4	$6,0 \cdot 10^9$	0,07	$5,8 \cdot 10^{12}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Seregin D., Vorotilov K., Sigov A., Kotova N. Ferroelectrics 484, 43 (2015).

Определение толщины нарушенного слоя в конденсаторных сегнетоэлектрических структурах

Подгорный Ю.В., Воротилов К.А., Сигов А.С.

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454, Россия,
(E-mail: podgsom_2004@mail.ru)

Предметом исследования являются золь-гель пленки $Pb(Zr_{0.48}Ti_{0.52})O_3$ на подложках Si-SiO₂-TiO₂-Pt [1].

С учетом того, что на измерение поляризации на вершинах петли не влияет ток утечки, для двух конденсаторных структур с идентичными сегнетоэлектрическими пленками толщиной L_1 и L_2 определяют экспериментальные зависимости поляризации на вер-

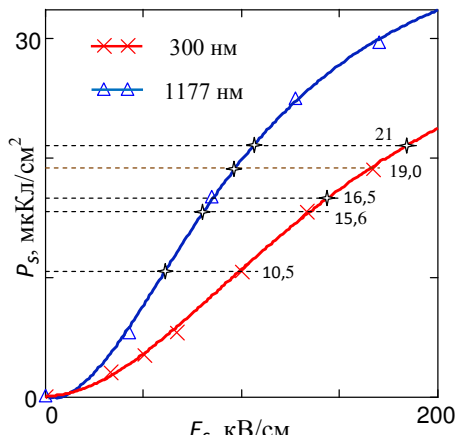


Рис. 1. Зависимости поляризации P_s на вершинах петель гистерезиса МСМ структур с пористыми пленками и моделирующие их сигмоидальные ММФ функции.

шинах петель гистерезиса от амплитуды приложенного поля $P_s(E_s)$. Полученные результаты интерполируются, например, сигмоидальной ММФ функцией, см. Рисунок. Для конкретного значения P_s по каждой из зависимостей в области максимальной крутизны находят значения E_{s1} и E_{s2} . Эквивалентная толщина нарушенного слоя вычисляется по формуле:

$$\delta_{P_s} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \delta}{P_s} (E_{s1} - E_{s2}) \frac{L_1 \cdot L_2}{L_2 - L_1}.$$

Повысить точность позволяет определение значений δ_{P_s} для нескольких значений P_s и последующее их усреднение, см. Рисунок. В таблице приведены значения эквивалентной толщины нарушенного слоя в структурах с плотной и пористой пленками ЦТС, определенные тремя методами: δ_ϵ путем измерения малосигнальной диэлектрической проницаемости на частоте 100 кГц, 25 мВ [2]; δ_{SPE} – по максимальной крутизне петель [3] и предлагаемым методом. Следует отметить, что первые два метода взаимоисключающие. Из результатов следует, что значения δ_{SPE} как для плотной, так и пористой пленки сильно занижены. Кроме того, нужно учитывать, что крутизну петель (дифференциальную диэлектрическую проницаемость) могут существенно завышать токи утечки, что и имеет место в случае структур с пористыми пленками [2]. В то же время для плотной пленки $\delta_{P_s} \approx \delta_\epsilon$, а для пористой ~ вдвое ниже.

Этому противоречию имеется достаточно убедительное объяснение. Во-первых, в рассматриваемом случае частота измерения малосигнальной емкости составляла 100 кГц, а петли гистерезиса – 100 Гц. Во-вторых, как показали исследования, омическая проводимость пористой пленки высока (~ на два порядка выше по сравнению с плотной пленкой ЦТС). В-третьих, емкость изолирующего слоя у структур с пористой пленкой по сравнению с плотной в семь раз меньше, см. таблицу.

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке гранта РФФИ 16-02-00845.

ЛИТЕРАТУРА

1. Seregin D., Vorotilov K., Sigov A., Kotova N. *Ferroelectrics* **484**, 1, 43-48 (2015).
2. Chen B. et al. *Applied Physics Letters* **84**, 4, 583-585 (2004).
3. Tagantsev A. K. et al. *Journal of Applied Physics* **78**, 4, 2623-2630 (1995).

Электродинамические параметры пленок PZT в ТГц-ИК области

**Породинков О.Е.¹, Командин Г.А.¹, Спектор И.Е.¹, Волков А.А.¹,
Серегин Д.С.², Воротилов К.А.², Сигов А.С.²**

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия
(E-mail: gakomandin@mail.ru)

²Московский технологический университет (МИРЭА) Москва, 119454, Россия

В работе исследованы электродинамические характеристики золь-гель пленок PZT на монокристаллических подложках MgO, Al₂O₃ и на платинированном кремнии в терагерцовом-инфракрасном диапазоне. Экспериментальные спектры отражения и пропускания измерены на субмиллиметровом монохроматическом спектрометре «Эпсилон» и на инфракрасном Фурье-спектрометре Bruker IFS113v.

Анализ функции диэлектрического отклика пленок PZT позволил определить основные полосы поглощения и зависимости их дисперсионных параметров от типа подложки и термообработки [1]. На рис. 1 представлены расчетные спектры диэлектрической проницаемости ϵ' пленок PZT на монокристаллических подложках и спектры аморфной пленки, не подвергнутой кристаллизации.

Исследование плотных и пористых пленок PZT на подложках платинированного кремния потребовало новых подходов для получения спектров диэлектрического отклика. Изменение объемной пористости пленки дает возможность управлять величиной ϵ' (рис. 2) и синтезировать толстые пленки. При этом выявлено отсутствие строгой корреляции между степенью пористости и величиной ϵ' . Спектры ТГц-ИК поглощения проанализированы в рамках концепции эффективного диэлектрического отклика среды [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант № 15-02-02335 и проекта Минобрнауки 11.2259.2017/ПЧ.

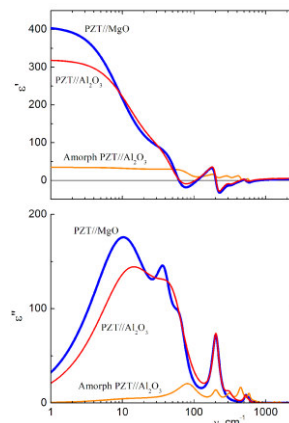


Рис. 1. Зависимости спектров диэлектрического отклика пленок PZT от типа подложки и термообработки.

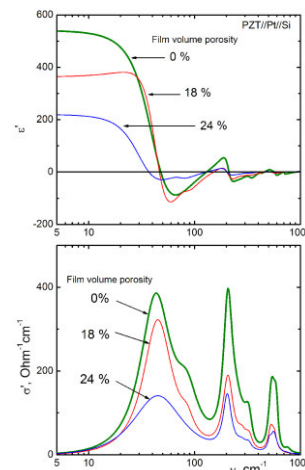


Рис. 2. Спектры диэлектрической проницаемости пленок PZT на платинированном кремнии в зависимости от

ЛИТЕРАТУРА

1. Командин Г.А. Породинков О.Е. и др. ФТТ **56**, 2135 (2014).
2. D. Nuzhnyy et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **47**, 495301 (2014).

Влияние механических напряжений и катионных замещений на зарядовое состояние межфазной границы $\text{LaAlO}_3/(001)\text{SrTiO}_3$

Бойков Ю.А.¹, Серенков И.Т.¹, Сахаров В.И.¹, Данилов В.А.¹,
Пронин И.П.¹, Тумаркин А.В.², Калабухов А.³, Клаесон Е.³

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе 194021, Санкт-Петербург, Россия
(E-mail: petrovich@mail.ioffe.ru)

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».
197376, Санкт-Петербург, Россия

³Chalmers University of Technology, SE-412 Gothenburg, Sweden

Появление наноразмерной прослойки квазидвухмерного электронного газа на границе между двух широкозонных диэлектриков (LaAlO_3 и SrTiO_3) индуцировало проведение многочисленных исследований, направленных на установление механизмов, ответственных за ее высокую латеральную проводимость. Катастрофа полярности [1], высокая концентрация кислородных вакансий [2], катионные замещения [3] были озвучены в качестве возможных причин высокой проводимости межфазной границы в гетероструктуре $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$.

Метод лазерного испарения (KrF , $\lambda=248$ nm, $t=30$ ns), был использован для выращивания пленок LaAlO_3 на поверхности TiO_2 терминированных подложек $(001)\text{SrTiO}_3$. Температура подложки поддерживалась на уровне $T_s=800^\circ\text{C}$, а давление кислорода P_{O_2} в ростовой камере составляло 10^{-5} mbar. Сформированные гетероструктуры были подвергнуты термообработке в течении 120 мин при $P_{\text{O}_2}=600$ mbar.

Состав и структура межфазной границы $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ в сформированных гетероструктурах исследовались с использованием спектроскопии рассеяния ионов средних энергий (MEIS, He^+ , $E = 96$ keV, каналовый и рэндом спектры). Важной отличительной чертой MEIS является аномально высокое разрешение состава исследуемого образца по толщине. Титанат стронция является виртуальным сегнетоэлектриком, спонтанная поляризация (P_s) в котором отсутствует [1-3] вплоть до сверхнизких температур. Появление отличной от нуля P_s в кристаллах титаната стронция может быть индуцировано механическими напряжениями и/или электрическим полем [4]. Параметр элементарной ячейки алюмината лантана ($\sim 3.789 \text{ \AA}$ [1]) существенно меньше соответствующего параметра титаната стронция ($\sim 3.905 \text{ \AA}$ [1]). Это индуцирует появление двухосных растягивающих в плоскости подложки механических напряжений в пленке LaAlO_3 , выращенной когерентно на подложке SrTiO_3 , и сжимающих латеральных напряжений в наноразмерной прослойке подложки, прилегающей к межфазной границе. Искажение элементарных ячеек в прослойке титаната стронция, прилегающей к межфазной границе, обуславливает появление P_s , вектор которой направлен перпендикулярно плоскости подложки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ohtomo A., Hwang H.Y., Nature, **427**, 423 (2004).
2. Kalabukhov A., Gunnarsson R., et al, J. Phys. Conf. Ser. **100**, 082039 (2008).
3. Kalabukhov A.S., Boikov Yu.A., et al, Phys. Rev.Lett. **103**, 146101 (2009).
4. Barr C.W., Sharma P., Wang, Y., et al, Nano Lett. **12**, 1765 (2012).

Влияние давления рабочего газа на состав и униполярность тонких пленок ЦТС, полученных методом ВЧ магнетронного осаждения

**Сенкевич С.В.¹, Пронин И.П.¹, Каптелов Е.Ю.¹, Долгинцев Д.М.²,
Пронин В.П.², Киселев Д.А.³**

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия (E-mail: SenkevichSV@mail.ioffe.ru)

²Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, 191186, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, 119991, Россия

Формирование тонких слоев ЦТС осуществлялось методом ВЧ магнетронного осаждения по двухстадийной технологии [1]. Кристаллизация фазы перовскита проводилась на воздухе при 600°C. Образцы изготавливались при вариации давления рабочей газовой смеси Ag+O₂ в диапазоне 2-8 Па. Для определения состава слоев ЦТС использовался REM EVO-40 (Carl Zeiss). Элементный анализ (рис.1) показал, что содержание свинца в осажденных пленках монотонно возрастало с ростом давления (кривая 1 на рис. 1). В отожженных пленках ниже 5 Па наблюдалось фазовое расслоение и соответствующее ему различие в содержании свинца в фазах перовскита и пироклора (кривые 2 и 3). Доля фазы пироклора возрастала с уменьшением давления. При низких давлениях

рост островков фазы перовскита происходил в результате перераспределения свинца между фазами пироклора и перовскита в пользу последней. Для оценки естественно униполярного состояния и его ориентации в тонких слоях ЦТС при вариации давления рабочего газа в работе использовалась силовая микроскопия пьезоотклика. Пьезоэлектрический отклик измерялся с помощью (MFP-3D SA, Asylum Research). Были построены гистограммы распределения униполярного состояния по площади пленок, позволяющие изучить динамику

его изменения при варьировании давления газовой смеси. Показано, что при высоких давлениях газа (8-6 Па) наблюдалась устойчивая униполярность с ориентацией вектора униполярности к подложке, а при низких давлениях (при содержании свинца близком к стехиометрическому) наблюдалось образование областей с противоположной ориентацией вектора униполярности. Причины подобного поведения обсуждаются в рамках модели формирования униполярности объемным зарядом, локализованным вблизи нижнего интерфейса ЦТС слоя.

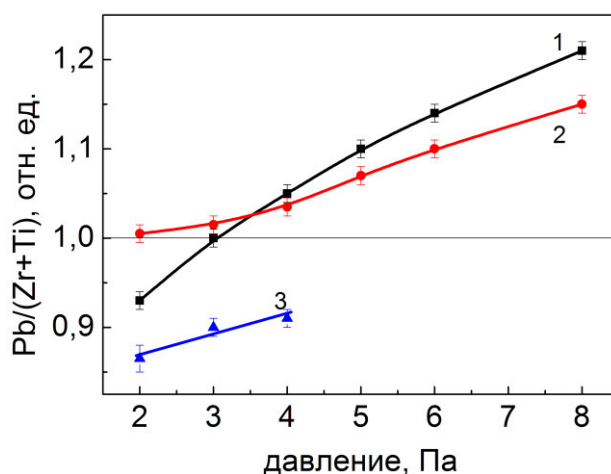


Рис. 1. Зависимость соотношения атомов Pb/(Ti+Zr) от давления рабочего газа. 1 – в аморфной пленке, 2 – в фазе перовскита, 3 – в фазе пироклора

ЛИТЕРАТУРА

1. Senkevich S.V., Kiselev D.A., Osipov V.V. et al., *Ferroelectrics*, **477**, 84 (2015).

Фотопроводимость гетероструктур на основе SiC/Si

Закамский Р.А.¹, Солнышкин А.В.¹, Сергеева О.Н.^{1,4}, Кукушкин С.А.²,
Феоктистов Н.А.³, Пронин И.П.³, Сенкевич С.В.³ Некрасова Г.М.⁴

¹Тверской государственной университет, Тверь, 170100, Россия

(E-mail: o_n_sergeeva@mail.ru)

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Россия

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Россия

⁴Тверская государственная сельскохозяйственная академия, Тверь, 170904, Россия

Гетероструктуры SiC/Si в основном используются в качестве буферных слоев и подложек для создания высокоэффективных оптоэлектронных, пьезо- и пироэлектрических устройств на основе нитридов галлия и алюминия [1,2]. Вместе с тем, ряд модификаций карбида кремния относится к полярным широкозонным полупроводникам, и отклик структуры на оптическое излучение представляет как научный, так и практический интерес [3-5]. В настоящей работе представлены результаты исследования фотовольтаических свойств пленок карбида кремния толщиной порядка 100 нм, эпитаксиально выращенных методом твердофазного замещения на подложках кремния, обладающих различными типами проводимости. Исследование фотовольтаического отклика проводилось динамическим методом при воздействии на гетероструктуру ИК-излучения с длиной волны 980 нм модулированного импульсами прямоугольной формы с частотой 10 Гц. Мощность лазерного излучения составляла 220 мВт. Полученный в результате светового воздействия сигнал регистрировался двухканальной платой сбора данных, подключенной к ПК, на второй канал которой подавался сигнал, воспроизводящий форму модулированного светового потока (опорный сигнал). В работе показано, что формы фотовольтаических откликов зависят от удельного сопротивления карбида кремния и представлены на рис. 1.

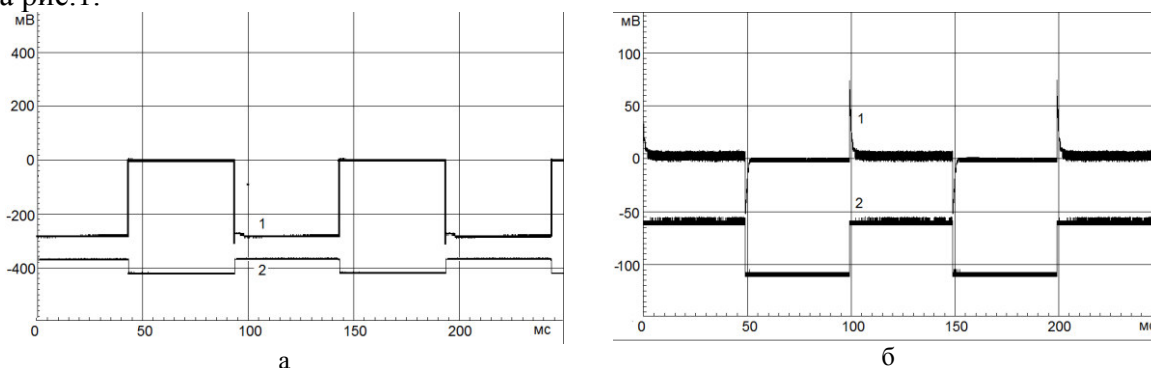


Рис. 1. Осциллограммы фотовольтаических откликов (1): а – для низкоомной, б – высокоомной пленки карбида кремния, (2) – опорный сигнал, воспроизводящий форму модулированного лазерного излучения.

В работе проведено также исследование спектральной зависимости фотопроводимости в видимой области электромагнитного спектра. Полученные экспериментальные результаты обсуждаются с позиции наличия р-п перехода, сформированного на границе раздела SiC/Si.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Н. Бессолов, А.С. Гращенко, Е.В. Коненкова и др. // ФТТ, **57**, 1916 (2015).
2. С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, О.Н. Сергеева и др. // ФТТ, **58**, 937 (2016).
3. S.A. Kukushkin, A.V. Osipov // J. Phys. D: Appl. Phys., **47**, 313001 (2014).
4. А.П. Беляев, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов // Письма в ЖТФ, **32**, 10 (2006).
5. М. О'Нейл // Силовая электроника, **1** (2009).

Формирование структур PZT на кремнии

Серегин Д.С.¹, Базирувиха А.-М.¹, Воротилов К.А.¹, Делимова Л.А.²,
Зайцева Н.В.², Руденко К.В.³, Лукичев В.Ф.³

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454, Россия
(E-mail: vorotilov@mirea.ru)

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Россия

³Физико-технологический институт РАН, Москва, 117218, Россия

В работе исследованы методы осаждения сегнетоэлектрических тонких пленок на кремниевых подложках без использования промежуточных слоев термического оксида и платины. Такие структуры перспективны, в частности, для создания ячеек энергонезависимой памяти с использованием сегнетоэлектрика в качестве подзатворного диэлектрика [1].

Были исследованы два направления создания подобных структур: с использованием диэлектрических барьерных слоев и созданием промежуточных слоев LaNiO₃ (LNO). В первом случае на поверхности кремниевых пластин методом атомно-слоевого осаждения (ALD) формировали барьерные слои Al₂O₃ и HfO₂ толщиной от 2 до 10 нм, после чего методом химического осаждения из растворов осаждали пленки PZT и напыляли верхний электрод. Вторая группа образцов представляла из себя структуры с предварительно нанесенным методом химического осаждения из растворов слоем LNO (см. рис.1).

Установлено, что в качестве барьерного слоя целесообразно использовать оксид гафния, однако достаточные барьерные свойства проявляются только в образцах с толщиной пленок 10 нм, что ограничивает возможности управления поверхностным потенциалом полупроводника в таких структурах.

Слои LNO обладают высокими барьерными свойствами и обеспечивают формирование столбчатой структуры перовскитных зерен. Величина остаточной поляризации составляет ~ 23 мкКл/см², максимум диэлектрической проницаемости 860 (см. рис. 2).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, проект 11.2259.2017/ПЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Park J.- H., et al, J. Appl. Phys. **119**, 124108 (2016).

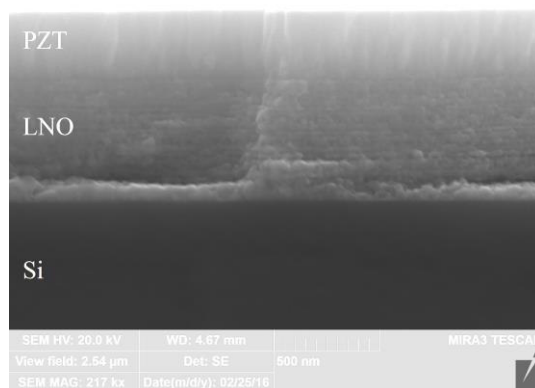


Рис. 1. Микрофотография скола гетероструктуры PZT/LNO/Si.

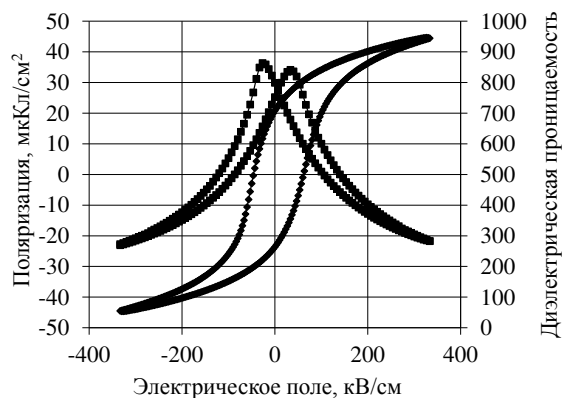


Рис. 2. Зависимость поляризации и диэлектрической проницаемости для гетероструктуры PZT/LNO/Si от электрического поля.

Исследование особенностей динамики решетки двухкомпонентных сегнетоэлектрических сверхрешеток

Тихонов Ю.А.¹, Разумная А.Г.¹, Захарченко И.Н.¹, Юзюк Ю.И.¹

¹*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
(E-mail: tickhonov.yuri@yandex.ru)*

Методами дифракции рентгеновских лучей и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) исследованы структурные параметры и особенности динамики кристаллической решетки в двухслойной $\text{BaTiO}_3/(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{TiO}_3$ (BT/BST) сверхрешетке, выращенной на кубической подложке (001)MgO методом импульсного лазерного осаждения. Определены параметры элементарных ячеек слоев, образующих сверхрешетку и её период модуляции. Поляризованные спектры КРС изучены в широком интервале температур 80-700 К. Проведено сравнение характеристик двухслойной сверхрешетки с трехслойным образцом $\text{BaTiO}_3/(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{TiO}_3/\text{SrTiO}_3$ (BT/BST/ST).

Анализ спектров КРС при комнатной температуре выявил понижение частоты мягкой E(ГO) моды в двухслойной сверхрешетке по сравнению с трехслойной. Отсутствие слоя ST приводит к уменьшению двумерных напряжений в двухслойной сверхрешетке, и изменяет последовательность фазовых переходов. При исследовании температурных зависимостей спектров КРС обнаружено, что в двухслойной сверхрешетке BT/BST фазовый переход из параэлектрической фазы в сегнетоэлектрическую наблюдается при 540 К, а в трехслойной сверхрешетке, из-за деформаций в плоскостях сопряжения между слоями, переход в параэлектрическую фазу существенно сдвинут в область высоких температур ~ 610 К.

В спектрах двухслойной сверхрешетки BT/BST в субтеррагерцовом диапазоне обнаружен релаксатор дебаевского типа, отсутствующий в спектрах трехслойного образца. Аномальное поведение интенсивности и частоты мягкой моды в двухслойном образце позволяет говорить о сложной природе фазовых переходов в слоях, составляющих этот объект, предполагаемой сосуществованием мягкой моды и центрального пика.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-12-00258).

Сегнетоэлектрические пленки на алмазоподобных подложках для сверхвысокочастотных применений

Тумаркин А.В.^{1,2}, Гагарин А.Г., Котельников И.В., Злыгостов М.В., Сапего Е.Н.

¹*С-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), С-Петербург, 197356, ул. проф. Попова, д. 5, Россия, (E-mail: avtumarkin@yandex.ru)*

²*Дагестанский государственный университет, Махачкала, 367000, ул. Гаджиева, д. 43а, Республика Дагестан, Россия*

Сегнетоэлектрические (СЭ) материалы представляют интерес в качестве основы для управляемых устройств сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. Одним из факторов, определяющих конкурентоспособность СЭ СВЧ элементов является их рабочая мощность. Известно, что для СЭ устройств на традиционных подложках фактором, ограничивающим мощность элемента, является перегрев рабочей области [1].

Одним из путей уменьшения перегрева рабочей области СЭ СВЧ устройства представляется использование подложек с высокой теплопроводностью [2,3]. В настоящей работе рассматривается возможность создания СЭ устройств на базе пленок твердого раствора титаната бария-стронция (BST) на алмазоподобных подложках (карбид кремния и синтетический алмаз). Достоинствами таких устройств будут являться простота технологии изготовления элементов и высокие уровни рабочей мощности.

Тонкие пленки BST на подложках карбида кремния и алмаза с подслоем SiC были получены высокочастотным ионно-плазменным распылением (ИПР) керамической мишени BaSrTiO₃. Температура подложек варьировалась в диапазоне 700-880°C. В качестве рабочего газа использовался кислород при давлении 2 Па. На основе полученных пленок изготовлены планарные конденсаторы с медными электродами.

Согласно данным рентгеновского дифракционного анализа исследуемые пленки проявляют хорошо сформированную кристаллическую структуру перовскита без включений вторичных фаз. По данным атомно-силовой микроскопии средняя шероховатость поверхности составляет 20 нм и практически не зависит от температуры осаждения. Размер перовскитовых зерен варьируется в диапазоне 100-300 нм, что типично для BST пленок, выращенных при низких давлениях рабочего газа.

Сопоставление электрофизических характеристик конденсаторных структур на основе исследуемых пленок показывает, что использование алмазоподобной подложки с высокой теплопроводностью позволяет понизить перегрев СЭ пленки за счет диссипации СВЧ мощности на порядок. Сравнение полученных данных с параметрами СЭ слоев на подложках сапфира показало, что пленки BST на алмазоподобных подложках перспективны для создания на их основе мощных управляемых СВЧ элементов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, в рамках проекта № 16-29-05147 офи_м и Российского научного фонда в рамках проекта № 15-19-10049.

ЛИТЕРАТУРА

1. Soldatenkov O., Samoiloa T., Ivanov A., Kozyrev A., Ginley D. and Kaydanova T. Appl. Phys. Lett. **89**, 232901 (2006).
2. Andrey Tumarkin, Sergey Razumov, Alexander Gagarin, Andrey Altynnikov, Anatoly Mikhailov, Roman Platonov, Igor Kotelnikov, Andrey Kozyrev and James E. Butler. IEEE Electron Device Letters, **37**, 6, 762 (2016).
3. Тумаркин А.В., Разумов С.В., Гагарин А.Г., Одинец А.А., Михайлов А.К., Стожаров В.М., Сенкевич С.В., Травин Н.К., Пронин И.П. ПЖТФ, **8**, 70 (2016).

Варьирование состава сегнетоэлектрических пленок при ионно-плазменном распылении: эксперимент и моделирование

Тумаркин А.В., Вольпяс В.А., Одинец А.А., Злыгостов М.В., Сапего Е.Н.

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), С-Петербург, 197356, ул. проф. Попова, д. 5, Россия, (E-mail: avtumarkin@yandex.ru)*

В настоящее время существует интерес к сегнетоэлектрическим (СЭ) материалам, обусловленный возможностью создания на их основе сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств. Однако, фактором, ограничивающим использование сегнетоэлектриков в технике СВЧ, является зависимость свойств материала от температуры. Перспективным методом повышения температурной стабильности СЭ элементов является использование градиентных структур на основе пленок различного компонентного состава.

В настоящей работе исследуется возможность создания градиентных пленок сегнетоэлектрических твердых растворов титаната бария-стронция, цирконата-титаната и станната-титаната бария путем управления потоками атомов, приходящих на подложку, за счет изменения давления рабочего газа в процессе роста пленки. В этом случае появляется возможность получать покрытия с переменным по толщине элементным составом, используя один источник материала, согласовывать кристаллические решетки СЭ пленки и подложки и управлять температурной зависимостью свойств СЭ пленок.

Тонкие СЭ пленки на подложках сапфира были получены высокочастотным распылением керамических мишеней. Чтобы исключить высокотемпературные процессы на подложке, температура подложек поддерживалась на уровне 25°C. В качестве рабочего газа использовался кислород, давление которого варьировалось в диапазоне 2-60 Па. Структура осажденных пленок исследовалась методом рассеяния ионов средних энергий (РИСЭ). Результаты экспериментального исследования сопоставлялись с результатами численного моделирования процесса транспорта распыленных атомов методом Монте-Карло. Для описания процесса переноса распыленных атомов использована модель термализации и диффузии атомных частиц в среде рабочего газа [1].

Экспериментальные исследования и результаты моделирования показывают, что в исследуемых пленках при давлении 2 Па наблюдается недостаток атомов Ва, что связано с большой длиной зоны термализации элемента, превышающей расстояние «мишень-подложка». При увеличении давления рабочего газа от 2 до 60 Па содержание Ва и Sn на подложке возрастает, а количество атомов Sr, Zr и Ti уменьшается с разной степенью интенсивности, обратно пропорциональной их массам.

Таким образом, при помощи изменения давления рабочего газа в процессе осаждения СЭ пленки появляется возможность по-разному влиять на длину термализации атомов различных масс, плотность потока и скорость доставки распыленных атомов к подложке, т.о., появляется возможность получать покрытия с переменным элементным составом по толщине пленки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, в рамках проектов № 16-07-00617 А, 16-08-00808 А и 16-29-05147 офи_м.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Вольпяс, А.Б. Козырев. ЖЭТФ **140**, 196 (2011).

Сегнетоэлектрические туннельные переходы на основе сверхтонких плёнок титаната бария на сапфире

Тумаркин А.В., Гагарин А.Г.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» С-Петербург, 197376, ул. проф. Попова, д. 5, Россия (E-mail: avtumarkin@yandex.ru)

Сильная зависимость туннельного сопротивления от величины электрического поля дает возможность создавать элементы энергонезависимой памяти с аналоговым хранением информации на основе сверхтонких сегнетоэлектрических плёнок - сегнетоэлектрические туннельные переходы (СТП) [1]. Использование в качестве подложки монокристаллического сапфира позволяет интеграцию СТП элементов памяти в электронные схемы "кремний на сапфире". Необходимым условием для реализации СТП является обеспечение условия "свободной" поляризации и исключение переходных слоёв на границе между сегнетоэлектриком и проводником. Такие условия могут быть достигнуты путём использования в качестве проводников оксидных плёнок со структурой перовскита, к которым, в частности, относится LaSrMnO_3 (LSMO) [2]. Основные требования, предъявляемые к нижнему электроду СТП структуры – это близость кристаллических решеток и минимальная шероховатость поверхности.

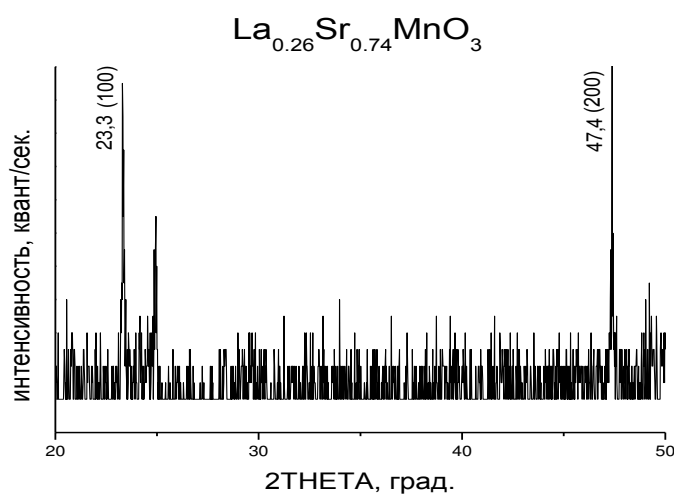


Рис. 1. Дифрактограмма эпитаксиальной пленки LSMO.

В работе экспериментально исследованы пленки LSMO, осажденные распылением мишени $\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{MnO}_3$ на сапфир и возможности формирования на них ориентированных пленок титаната бария. Данные рентгеновской дифрактометрии для пленок LSMO, осажденных при температуре 700°C, свидетельствуют об эпитаксиальной (100) структуре с параметром решетки 3.81 Å (рис. 1). Шероховатость пленки, измеренная методом атомно-силовой микроскопии, составляет менее 1 нм. Пленки титаната бария, выращенные на подслое LSMO в температурном диапазоне 700-880°C, демонстрируют зависимость кристаллической структуры и фазового состава от температуры осаждения. Эпитаксиальная пленка нижнего электрода с шероховатостью поверхности менее нанометра позволяет рассчитывать на эпитаксиальный рост сегнетоэлектрического слоя при соответствующем выборе технологических условий осаждения.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 16-08-00808 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Garcia V. and Bibes M. Nat. Commun. **5**, 4289 (2014)
2. Abuwasib M., Lee H., Sharma P. 73-rd Device Research Conference (DRC), 45 (2015).

Локальные пьезоэлектрические свойства перфорированных сегнетоэлектрических пленок

Шерстюк Н.Э.¹, Иванов М.С.^{1,2}, Мишина Е.Д.¹, Холкин А.Л.²

¹Московский технологический университет (МИРЭА), 119454, просп.Вернадского, 78, Москва, Россия (E-mail: nesherstuk@mail.ru)

²CICECO - Materials Institute of Aveiro & Physics Department, University of Aveiro, 3810-193, Aveiro, Portugal

Параметры переключения поляризации являются критически важными для разработки и реализации приборов и устройств на основе низкоразмерных сегнетоэлектрических структур. Особое внимание уделяется, в частности, выявлению зависимости параметров переключения от состава и метода изготовления пленок [1], а также выявлению влияния размерных эффектов и параметров переменного электрического поля [2,3]. При переходе к наноразмерам значительно возрастают требования к качеству материала, и роль дефектов различной природы становится определяющей для наиболее важных функциональных параметров структур: диэлектрической проницаемости, потерь, времени переключения и др. Создание фотонных кристаллов (ФК) на основе сегнетоэлектрических тонких пленок расширяет возможности практического применения наноструктурированных сегнетоэлектриков, однако ФК вносит дополнительные значительные неоднородности в структуру и функциональные свойства образца. В связи с этим необходимы исследования распределения состояния поляризации в области всех структурных элементов, а также в приэлектродной области в зависимости от параметров приложенного внешнего электрического поля.

В докладе представлены результаты исследования распределения поляризации в перфорированных эпитаксиальных пленках титаната бария-стронция ($\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$) толщиной 1 мкм при приложении электрического поля в планарной геометрии. Перфорированная структура была изготовлена методом травления фокусированным ионным пучком в зазорах между электродами (диаметр отверстий 880 нм, расстояние между отверстиями 1 мкм). Исследования проводились методом электро-силовой микроскопии и микроскопии пьезо-отклика. Показано значительное увеличение эффективных значений пьезоэлектрических тензоров в перфорированных пленках по сравнению с неперфорированными: в 13 раз для латерального и в 4 раза для вертикального пьезо-отклика. Этот результат согласуется с сообщавшимся ранее усилением генерации оптической второй гармоники в перфорированных пленках, наблюдаемым в макроскопических экспериментах [4]. Мы предполагаем, что возможным механизмом для роста пьезо-отклика является уменьшение напряжения в пленке, вызванного влиянием подложки. Полученные результаты имеют значение для понимания наномасштабных пьезо- и сегнетоэлектрических свойств в фотонных кристаллах и других структурах, изготовленных методом фокусированного ионного пучка на основе сегнетоэлектрических материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. W.K. Chen, et al. J. Phys. Chem. Solids. **61**, 3, 969 (2000).
2. K. Matyjasek, et al. Cond. Matter Phys. **16**, 3, 31 701 (2013).
3. M. Dubreuil, et al. Opt. Lett. **35**, 7, 1019 (2010).
4. К.А. Брехов и др. ФТТ, **56**, 10, 1941 (2014).

Микроскопия планарного переключения поляризации в сегнетоэлектрических пленках $(\text{BaSr})\text{TiO}_3$

Шестакова А.П.¹, Билык В.Р.¹, Гришунин К.А.¹, Мишина Е.Д.¹

¹Московский Технологический Университет, Москва, 119454, Россия
(E-mail: nastik_shestakova@mail.ru)

Нелинейно-оптическая сканирующая конфокальная микроскопия, основанная на генерации второй оптической гармоники (ГВГ), эффективна при исследовании доменной структуры сегнетоэлектриков и мультиферроиков, а также эффектов переключения поляризации и особенностей фазовых переходов в сегнетоэлектрических и мультиферроидных микроструктурах [1]. Обычно спонтанно поляризованное состояние реализуется в объемных сегнетоэлектриках и толстых пленках в виде доменной структуры, т.е. макроскопических областей в кристалле, где в пределах одной области все элементарные ячейки поляризованы одинаково. Для этого существует много причин: неоднородные деформации, микроскопические дефекты, понижение энергии, связанное с электростатикой. Макроскопическая объемная поляризация связана со смещением положительных зарядов относительно отрицательных. При этом на противоположных поверхностях образца должны возникать заряды противоположных знаков.

С помощью микроскопии ГВГ были исследованы структуры $(\text{BaSr})\text{TiO}_3$ на подложках MgO [111] с толщинами пленок 800 нм и 1000 нм. Нелинейно-оптическое картирование поверхности пленки проводилось при помощи фемтосекундного лазера с длиной волны накачки 800 нм, частотой повторения 80 МГц и длительностью импульсов 100 фс, и лазерного сканирующего микроскопа WITec alpha 300S+. Конфокальная геометрия эксперимента позволяет получить разрешение до 200 нм [2]. На рис.1 представлено изображение поверхности пленки BST, это позволяет охарактеризовать поверхность как состоящую из мелких зерен, латеральный размер которых составляет 1-2 мкм. Микроскопия ГВГ позволила исследовать доменную структуру сегнетоэлектриков и мультиферроиков, выявить локальное переключение 180° -х доменов в нелинейнооптическом отклике. Основное отличие микроскопии ГВГ от линейной микроскопии заключается в возможности визуализации 180° -х сегнетоэлектрических доменов, что невозможно в линейной оптике. Это связано с тем, что замена знака поляризации меняет знак некоторых компонент нелинейной восприимчивости, в то время как для линейной восприимчивости этого не происходит.

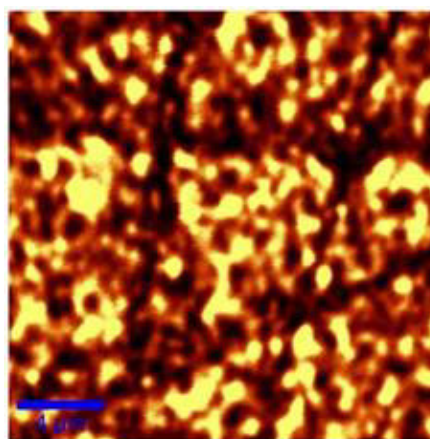


Рис. 1. ГВГ микроскопия пленки BST.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-12-10520.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.М. Мухортов, Ю.И. Головкин, В.В. Колесников, С.В. Бирюков. Письма в ЖТФ, **31**, 75-80 (2005).
2. К.А. Брехов, Н.А. Ильин, С.Д. Лавров, Н.Э. Шерстюк, Е.Д. Мишина, В.М. Мухортов. ФТТ, **56**, 1941-1945 (2014).

Нелинейные оптические свойства третьего порядка в допированных полимерных сегнетоэлектриках

**Верховская К.А.¹, Кривенко Т.В.², Савельев В.В.², Гришина А.Д.²,
Ванников А.В.²**

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333, Москва, Россия (E-mail: vkira123@gmail.com)

²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 119071, Москва, Россия

Проведен анализ восприимчивости третьего порядка в сополимере винилиденфторида с трифторэтиленом (ВДФ/ТрФЭ), содержащем цианиновый краситель. Известно [1], что эти сополимеры состоят из кристаллических ламелл, перемешанных с областями аморфной фазы. При измерении нелинейных оптических характеристик применяли метод z -сканирования с использованием импульсного наносекундного Nd:YAG лазера (1064 nm). Луч, фокусируемый линзой, пересекал фокальную область. Плотность энергии лазерного луча в фокусе на несколько порядков превышает плотность энергии без линзы и вызывает появление нелинейных оптических эффектов. Применяли слои толщиной около 5 μm , политые из раствора в ацетоне.

При хаотическом распределении хромофоров за нелинейные свойства отвечает восприимчивость третьего порядка, равная:

$$\chi^{(3)} = N\gamma f^4 \langle \cos^4 \xi \rangle, \quad (1)$$

где среднее значение $\langle \cos^4 \xi \rangle = 1/5$, γ – молекулярная поляризуемость третьего порядка, N – концентрация хромофоров, $f = (n_0^2 + 2)/3$ – корреляционный фактор Лоренца, $n_0 = 1.5$ – линейный показатель преломления. Коэффициенты нелинейности возрастают при высокой интенсивности света за счет преломления и оптического поглощения до значений:

$$n = n_0 + n_2 I_0 \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \beta I_0 \quad (3)$$

Суммарная диэлектрическая восприимчивость ПВДФ/ТрФЭ после поляризации при 400 V равна $[(\text{Re}\chi^{(3)})^2 + (\text{Im}\chi^{(3)})^2]^{0.5} = 2,44 \times 10^{-9}$ esu в образце с соотношением ВДФ/ТрФЭ 60 : 40 и $1,97 \times 10^{-9}$ esu при соотношении 70 : 30. Снижение пропускания после поляризации при 400 V может быть вызвано нарушением первоначальной хаотичности, связанным с упорядочением диполей в кристаллических областях и соответствующим увеличением оптической плотности образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Furukawa T. Phase transitions **18**, 143 (1989).

Электрополевой эффект в спектрах ЭПР кристаллов $\text{SrTiO}_3:\text{Mn}$

**Габбасов Б.Ф.¹, Юсупов Р.В.¹, Зверев Д.Г.¹, Трепаков В.А.^{2,3},
Jastrabik L.³, Dejneka A.³**

¹Казанский федеральный университет, Казань, 420008, Россия
(E-mail: Roman.Yusupov@kpfu.ru)

²Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург, 194021, Россия

³Institute of Physics AS CR, Na Slovance 2, 182 21 Prague 8, Czech Republic

Титанат стронция SrTiO_3 (STO) принадлежит к классу высокополяризуемых оксидов со структурой перовскита ABO_3 . Этот материал исследуется давно, однако по сей день обнаруживаются явления, интересные как с прикладной, так и с фундаментальной точек зрения. Важным способом модификации свойств STO является его легирование разного рода примесями. Интересным вариантом примеси в STO является марганец. Так, в кристаллах и керамиках STO:Mn наблюдались диэлектрические аномалии, связанные с эффектами полярного упорядочения, и магнитные петли гистерезиса, что было интерпретировано как проявление фазы магнитоэлектрического мультитекла [1].

Целью нашего исследования было выяснение и уточнение микроструктуры примесных центров марганца в титанате стронция. Информативным методом для решения такого рода задач является спектроскопия ЭПР. Задача по обнаружению наличия либо отсутствия центра инверсии у примесного парамагнитного центра может быть решена исследованиями электрополевого эффекта в спектрах ЭПР.

Нами наблюдался электрополевой эффект в спектрах ЭПР ионов Mn^{4+} при $T = 150$ К. Квадратичный характер эффекта говорит о центральносимметричном положении иона Mn^{4+} в кислородном октаэдре. Необычно большая величина эффекта связана с большой диэлектрической восприимчивостью STO и, соответственно, сильным локальным электрическим полем.

Электрополевой эффект на центрах Mn^{2+} при комнатной температуре проявляется в небольшой наведенной электрическим полем аксиальности, квадратичной по полю, и заметном уширении компонент тонкой структуры спектра при электрическом поле, сонаправленном с постоянным магнитным полем спектрометра. Уширение линий спектра наблюдается также при понижении температуры и следует закону Аррениуса с энергией активации 34 мэВ. Зависимость ширины линий спектра ЭПР от поля также носит экспоненциальный характер. Изменение ширины линий с температурой и электрическим полем связано динамическим характером центров Mn^{2+} в STO. Замедление динамики центра приложенным электрическим полем однозначно указывает на наличии электрического дипольного момента у центров Mn^{2+} и на то, что проявляющаяся динамика связана с перескоками между нецентральными позициями.

В то же время, нами не наблюдалось детектируемой модификации спектра ЭПР для низкосимметричных центров Mn^{2+} , наблюдаемых при $T = 4.2$ К вследствие замораживания динамики центров [2]. Это, вкупе с большим эффектом на ионах Mn^{4+} в тех же образцах и тех же условиях, на наш взгляд, свидетельствует о неоднородной структуре кристалла STO:Mn с полярными областями вблизи центров Mn^{2+} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Shvartsman V.V. et al. Phys. Rev. Lett. **101** 165704 (2008).
2. Зверев Д.Г., Юсупов Р.В., Родионов А.А. и др. Опт. и спектр. **116** 891 (2014).

Пикосекундная динамика фотовозбужденных состояний в магнониобате свинца

Леонтьев А.В.¹, Мамин Р. Ф.^{1,2}

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН, Казань, 420029, Россия (E-mail: mailscrew@gmail.com)

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований внутризонной динамики фотовозбужденных состояний и населенности дефектных уровней в магнониобате свинца $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (PMN) после облучения фемтосекундными лазерными импульсами при комнатной температуре.

Возбуждение в схеме «накачка-зондирование» импульсами четвертой гармоники фемтосекундного иттербиевого лазера ($\lambda=263$ нм, длительность 150 фс, пиковая интенсивность 1 МВт/см²) сопровождалось забросом носителей заряда в зону проводимости (ширина запрещенной зоны в PMN составляет 3,4 эВ). Зондирование осуществлялось импульсами второй гармоники того же лазера, спектр которых с максимумом на 526 нм перекрывается полосой эмиссии дефектных центров [1], с регулируемой задержкой во времени. Зарегистрировано нарастание прозрачности образца с характерным временем 600 ± 20 пс, отражающее процесс захвата дефектами фотовозбужденных носителей (рис. 1 (кривая 1)).

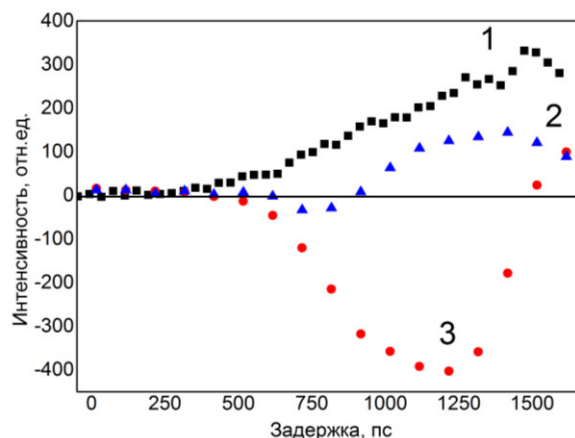


Рис. 1. Изменение интенсивности зондирующего пучка в зависимости от задержки относительно возбуждения: 1 - полного пучка, 2,3 – части, прошедшей через диафрагму, при возбуждении излучением 0,3 МВт/см² и 1 МВт/см², соответственно

Эволюцию концентрации свободных носителей в эксперименте можно проследить, регистрируя динамику наведенного изменения показателя преломления [2]. Для этого в зондирующий пучок помещена диафрагма, блокирующая ~90% излучения в отсутствие возбуждения. Дополнительная дефокусировка пучка, вызванная наведенным изменением показателя преломления среды, приводит к уменьшению засветки детектора. Регистрируемый таким образом сигнал, пропорциональный изменению показателя преломления и концентрации «холодных» свободных носителей [2], накладывается на сигнал наведенной прозрачности (рис.1 (кривые 2 и 3)). Характерное время нарастания этой компоненты соответствует характерному времени процессов термализации и охлаждения фотовозбужденных носителей и составляет 180 ± 10 пс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zverev D.G., Migachev S.A., Mamin R.F., Nikitin S.I and Sadykov M.F., *Ferroelectrics* 307, 137 (2004).
2. E. C. Fox, E. Canto-Said and H. M. van Driel, *Appl. Phys. Lett.* 59, 1878 (1991).

Оптические характеристики объемно-профилированных монокристаллов SBN:61:Tm^{3+}

Лыков П.А., Папашвили А.Г., Дорошенко М.Е., Ивлева Л.И.

*Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38
(E-mail: lykov@lst.gpi.ru)*

Легирование кристаллов ионами Tm^{3+} позволяет создавать активные среды для получения лазерной генерации в области 2 мкм. В тоже время, наличие у кристаллов нелинейно-оптических свойств может расширить возможности по использованию данных материалов [1].

Сегнетоэлектрик-релаксор ниобат бария-стронция $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN) является интересной экспериментальной средой, параметры которой можно существенно изменять как за счет изменения соотношения основных компонентов (Sr/Ba), так и путем введения различных примесей, в том числе РЗЭ. Ранее для кристаллов SBN:Tm были исследованы структура и сегнетоэлектрические свойства [2,3]. Разработанная в ИОФРАН технология получения объемно-профилированных кристаллов SBN модифицированным способом Степанова позволяет получать данные кристаллы высокого оптического качества и использовать их в качестве активной среды.

В настоящей работе была выращена концентрационная серия объемно-профилированных монокристаллов SBN:61, легированных ионами Tm^{3+} . Концентрация Tm_2O_3 в расплаве изменялась от 0.5 до 2.0 мас.%. Получены спектры поглощения выращенных кристаллов в диапазоне длин волн 400-2000 нм. По величинам коэффициентов поглощения на длинах волн характерных линий поглощения ионов Tm^{3+} был рассчитан эффективный коэффициент распределения примеси Tm^{3+} в объемно-профилированных кристаллах SBN:61, который составил $0.65 \div 0.7$. В оптимальных условиях эксперимента концентрация Tm^{3+} по длине кристалла (40мм) и сечению (15×26 мм) остается постоянной.

Исследованы спектры возбуждения и люминесценции, кинетики затухания люминесценции ионов тулия для различных переходов. Характер полученных спектральных зависимостей, позволяет предположить наличие в кристаллах SBN по крайней мере двух различных типов оптических центров ионов Tm^{3+} . При накачке лазерным диодом (790нм) была получена лазерная генерация в области длин волн 2 мкм с кпд $\sim 4.4\%$ (рис.1).

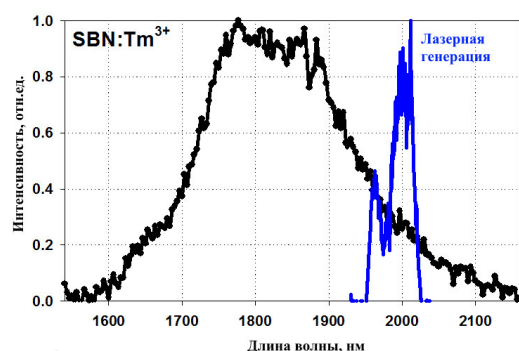


Рис. 1. Спектры люминесценции и лазерной генерации кристалла SBN:Tm^{3+} (накачка 790 нм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Doroshenko M.E., Papashvili A.G., Dunaeva E.E. et.al., *Optical Materials* 60, 119 (2016).
2. Волк Т.Р., Салобутин В.Ю., Ивлева Л.И. и др., *ФТТ* 42, 2066 (2000).
3. Черная Т.С., Волк Т.Р., Максимов Б.А. и др., *Кристаллография* 48, 1000 (2003).

Роль водородных связей в аномалиях диэлектрических свойств кристаллогидратов и полимеров

Новик В.К., Гаврилова Н.Д.

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия
(E-mail: novikmp@orc.ru)*

Методом диэлектрической спектроскопии в диапазоне частот $10^{-1} \div 10^6$ Гц и температур $2 \div 93^\circ\text{C}$, нами был изучен ряд объектов с водородными связями ОН...О (кристаллогидраты формиатов эрбия, иттрия, гольмия, системы «полимер-вода»), объединенных общим признаком — длиной связи $R_{oo} \approx 2,6 \div 2,9 \text{ \AA}$ [1, 2, 3]. Во всех объектах на температурно-частотных зависимостях проводимости $\sigma(f, T)$, диэлектрических проницаемостей $\epsilon'(f, T)$ и $\epsilon''(f, T)$, диэлектрических модулей $M'(f, T)$ и $M''(f, T)$ на фоне монотонных поверхностей наблюдались аномалии в области $30 \div 50^\circ\text{C}$ и $65 \div 80^\circ\text{C}$. Вычисленные из экспериментальных данных параметры - времена релаксации τ , ширина времен релаксации α , степень фрактально-степенной зависимости проводимости s , энергии активации процессов проводимости H и релаксации ΔU — также демонстрируют аномалии при тех же температурах.

Как известно, длина водородной связи воды составляет $R_{oo} \approx 2,76 \text{ \AA}$. Температуры ряда аномалий воды (особые точки воды) лежат в названных интервалах: 36°C — минимум удельной теплоемкости, 48°C — минимум изотермической сжимаемости, 60°C — минимум напряжения сдвига, 80°C — максимум скорости звука. Корреляция длин водородных связей с температурами аномалий для столь разнородных объектов позволяет предположить, что причины близости точек температурных аномалий физических свойств заключена в идентичном наборе дискретных уровней энергии протона в двухминимумном потенциале, которые перезаселяются при нагревании образцов. Прием, особенность этого процесса состоит в относительно длительном времени релаксации, что обуславливает использование методик типа низкочастотной диэлектрической спектроскопии.

Подходы, разработанные в данной экспериментальной работе, могут быть использованы для анализа механизмов не только низкочастотного диэлектрического отклика, но также токов термодеполяризации, эффекта термолюминисценции и других свойств широкого круга материалов, в том числе горных пород, полимерных порошков со связанной водой, а также самой воды с включением примесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gavrilova N.D., Vorobie A.V., Malyshkina I.A. et al., *Ferroelectrics*, **478**. 88 (2015);
2. Gavrilova N.D., Malyshkina I.A., Makhaeva E.E. et al., *Ferroelectrics*, **504**. 3 (2016);
3. Гаврилова Н.Д., Воробьев А.В., Малышкина et al., *ВМС*, сер. А, 58. 37 (2016).

Диэлектрические характеристики и эффект Мёссбауэра в керамике $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ при $T=10\text{-}500\text{ K}$

Павленко А.В.^{1,2}, Кубрин С.П.², Шилкина Л.А.², Резниченко Л.А.²

¹Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Россия
(E-mail: tolik_260686@mai.ru)

²Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, 344090, Россия

Ферро-вольфрамат стронция, $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ (SFWO) является мультиферроиком, который при температурах ниже 373 К сочетает в себе ферромагнитные и антисегнетоэлектрические свойства [1]. В настоящее время данное соединение рассматривается как компонент новых мультиферроидных материалов, однако его свойства методами диэлектрической и мёссбауэровской спектроскопии, дающих ценную информацию о закономерностях формирования диэлектрических характеристик, магнитоэлектрическом взаимодействии, магнитных фазовых превращениях и др., практически не изучены. Восполнению этих пробелов и посвящена настоящая работа.

Керамика SFWO была изготовлена в отделе ИМиНТ НИИ физики ЮФУ. SFWO была свойственна тетрагональная структура с параметрами перовскитовой ячейки $a_p=3.9419\text{ \AA}$, $c_p=3.9556\text{ \AA}$ и $c_p/a_p=1.0035$. Мёссбауэровский спектр (МБ) объекта, измеренный при температуре 14 К, состоял из трех зеемановских секстетов, величины изомерных сдвигов которых соответствуют ионам Fe^{3+} в октаэдрическом окружении. Различия в величинах квадрупольных смещений и магнитных сверхтонких полей указывает на наличие трех неэквивалентных позиций ионов Fe^{3+} . По-видимому, секстет с наибольшей площадью соответствует ионам Fe^{3+} , «соседями» которого в В-подрешётки являются преимущественно также ионы Fe^{3+} . Два других секстета соответствуют ионам Fe^{3+} , соседствующих с ионами W^{5+} . Из анализа температурной зависимости интенсивности линий МБ установлено, что температура магнитного фазового перехода $T_M \approx 400\text{ K}$.

В SFWO при $T = 10\text{-}200\text{ K}$ величины относительной диэлектрической проницаемости (ϵ/ϵ_0) и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ от температуры и частоты измерительного электрического поля в диапазоне $10^3\text{-}10^6$ Гц практически не зависят, а дальнейшее повышение температуры сопровождается резким ростом ϵ/ϵ_0 , постепенным усилением её дисперсии и формированием аномалий в окрестности T_M , а на зависимостях $\text{tg } \delta(T)$ формируются максимумы, сдвигающиеся в область высоких температур по мере увеличения f . В связи с тем, что SFWO является антисегнетоэлектриком с $T_C \sim 473\text{ K}$ [1], а исследуемая керамика при комнатной температуре характеризуется достаточно низким электросопротивлением, наблюдаемое связано с проявлением эффектов межслоевой поляризации и релаксации, часто проявляющейся в керамических материалах, являющихся по своей структуре электрически неоднородными на микроскопическом уровне, в частности, из-за разной проводимости и диэлектрической проницаемости зерен и границ зерен.

Работа выполнена при фин. поддержке РФФИ (№16-32-60095 мол_а_дк), государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ) и с использованием оборудования ЦКП «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики ЮФУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ivanov S.A., Ericsson S.-G., Tellgren R., Rundlof H. Mat. Res. Bullet. 36, 2585 (2001).

Спектральная зависимость фотоэлектрических свойств кристаллов ниобата лития

Сюй А.В.¹, Сидоров Н.В.², Габаин А.А.², Палатников М.Н.²,
Штарев Д.С.^{1,3}, Теплякова Н.А.²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
Хабаровск, 680021, Россия

²Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.
Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, 184209, Россия (E-mail: sidorov@chemy.kolasc.net.ru)

³Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, 680000,
Россия

Нелинейно-оптический кристалл ниобата лития (LiNbO_3) — сегнетоэлектрик с уникальными физическими характеристиками, широко используемый в пьезотехнике, квантовой, опто- и акустоэлектронике. Ниобат лития имеет широкую область гомогенности на фазовой диаграмме. Характеристиками кристалла в достаточно широких пределах можно эффективно управлять, структурируя расплав, изменяя стехиометрию кристалла и путем легирования. Сравнительные исследования взаимосвязи структурных особенностей, оптической однородности, электрооптических и фоторефрактивных свойств кристаллов LiNbO_3 разного состава имеют важное значение для создания оптических материалов различного назначения (электрооптических модуляторов, затворов, переключателей и др.) с заданными оптическими свойствами [1].

По параметрам индикатрисы фотоиндуцированного рассеяния света, используя метод, описанный в работе [2], нами для длин волн возбуждающего лазерного излучения 476.5, 488.0, 514.5, 532.0 нм определены фотовольтаическое и диффузионное поля в сериях конгруэнтных монокристаллов ниобата лития разного состава, легированных в широком диапазоне концентраций различными примесями: $\text{Zn}(0.018\text{-}2.93 \text{ вес. } \%)$, $\text{Zn+Fe}(1.94\text{+}0.008)$, $\text{Y}(0.46)$, $\text{Gd}(0.002\text{-}0.05)$, $\text{B}(0.008\text{-}0.12)$, $\text{Mg+Fe}(0.86\text{+}0.0036)$, $\text{Cu+Gd}(0.005\text{-}0.13\text{+}0.004\text{-}0.101)$, $\text{Gd+Mg}(0.002\text{-}0.23\text{+}0.4\text{-}0.075)$. Определены фотоиндуцированные изменения показателя преломления кристаллов в соответствие с линейным электрооптическим эффектом. Показано, что от вида и концентрации легирующей добавки в значительной степени зависят величины фотовольтаического и диффузионного полей и как следствие значение фотоиндуцированного двулучепреломления.

В кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:B}$ с увеличением концентрации бора от 0.008 вес. % до 0.12 вес. % происходит уменьшение величины фотовольтаического поля, создаваемого в образце от 12.5 до 9.2 кВ/см, а в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:Gd}$ в диапазоне легирования 0.002 – 0.05 вес. % наоборот величина поля увеличивается ($E = 6.25\text{-}8.77$ кВ/см). Однако в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ в диапазоне концентраций 0.018-2.93 вес. % не наблюдается такой прямой зависимости как в кристаллах с бором и гадолинием. На разных длинах волн кристаллы $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ имеют различные зависимости величины фотоэлектрического поля от концентрации Zn. При этом наблюдаются пороговые эффекты в районе 2.05 вес. %, т.е. экстремумы в исследуемых зависимостях величины фотоэлектрического поля от концентрации цинка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lengyel K., Peter A., Covacs L. et al., Applied Physics Reviews **2**, 040601 (2015).
2. Goulikov M., Imlau M., Woike Th. Phys. Rev. **B 77**, 235110 (2008).

Экспериментальные и теоретические исследования нецентральных атомов кобальта в SrTiO₃

Случинская И.А., Лебедев А.И.

*Московский государственный университет им М.В. Ломоносова, Москва, 119991,
Россия (E-mail: irinasluch@gmail.com)*

Поиск новых магнитных нецентральных примесей, которые могут одновременно приводить к возникновению сегнетоэлектрического и магнитного упорядочений и магнитоэлектрическому взаимодействию в кристаллах, в настоящее время является актуальной задачей. Материалы, обладающие этими свойствами, относятся к мультиферроикам – многофункциональным материалам, которые открывают новые возможности для современной электроники. Примером таких материалов является SrTiO₃ с нецентральным атомом Mn в узле *A* (см. [1–3] и ссылки в этих работах).

В настоящей работе методами XAFS-спектроскопии исследовано структурное положение и зарядовое состояние магнитной примеси кобальта в образцах SrTiO₃, синтезированных в различных условиях. Полученные результаты сопоставляются с результатами расчетов структуры дефектов, проведенных из первых принципов.

Образцы SrTiO₃ с концентрацией примесей 2–3% Co и различным отклонением от стехиометрии готовились методом твердофазного синтеза и отжигались при температурах 1100–1600°C. Запись спектров флуоресцентного EXAFS и XANES проводилась на источнике синхротронного излучения BESSY на станции КМС-2 на *K*-крае Co при 300 К. Обработка спектров XAFS проводилась традиционным способом.

Анализ спектров XANES показал, что Co в SrTiO₃ находится в зарядовых состояниях +2 или +3 в зависимости от условий синтеза. Обработка спектров EXAFS показала, что примесные атомы Co могут одновременно входить в узлы *A* и *B* решетки SrTiO₃ в разных зарядовых состояниях, причем их количественное соотношение в этих узлах зависит от условий синтеза. Часть атомов находится в узлах *B* в зарядовом состоянии Co³⁺ ($R_{\text{Co-O}}=1.92 \pm 0.01 \text{ \AA}$) и они являются центральными, ионы Co²⁺ занимают узлы *A* и смещены из узлов кристаллической решетки (расстояние до 4-х ближайших атомов кислорода $R_{\text{Co-O}}=1.99 \pm 0.01 \text{ \AA}$).

Расчеты геометрии и магнитной структуры примеси Co в SrTiO₃ проводились из первых принципов на 80-атомных ГЦК-сверхъядерках в приближении LDA+*U*. Они показали, что ионы Co³⁺ в узле *B* являются центральными, находятся в низкоспиновом состоянии ($S=0$) и характеризуются расстоянием до ближайших атомов $R_{\text{Co-O}}=1.90 \text{ \AA}$. Ионы Co²⁺ находятся в высокоспиновом состоянии ($S=3/2$) и сильно смещены из узла *A* (на $\sim 1.1 \text{ \AA}$), при этом расстояние до четырех ближайших атомов кислорода составляет $R_{\text{Co-O}}=1.99 \text{ \AA}$.

Расчеты из первых принципов геометрии и магнитной структуры легированных образцов качественно согласуются с экспериментальными данными, а расчеты электронной структуры позволяют объяснить природу сильного примесного поглощения в образцах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tkach A., Vilarinho P.M., Kholkin A.L. Acta. Materialia **54**, 5385 (2006).
2. Лебедев А.И., Случинская И.А., Ерко А., Козловский В.Ф. Письма ЖЭТФ, **89**, 545 (2009).
3. Случинская И.А., Лебедев А.И., Ерко А. Изв. РАН. Сер. физ., **74**, 1289 (2010).

ЯМР исследования KDP и DKDP в условиях наноконфайнмента

Ускова Н.И.¹, Подорожкин Д.Ю.¹, Чарная Е.В.¹, Нефедов Д.Ю.¹,
Барышников С.В.²

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, 198504, Россия (E-mail: natashazaitseva@yandex.ru)

²Благовещенский государственный педагогический университет, Благовещенск, 675000, Россия

Проведены ЯМР исследования нанокомпозитов (молекулярные сита MCM-41 и пористое стекло с размером пор 3,7 нм и 7 нм соответственно), заполненных дигидрофосфатом калия KDP, и нанокомпозитов (молекулярные сита MCM-41 с размером пор 3,7 нм и опал с диаметром силикатных шаров 220 нм), заполненных дейтерированным дигидрофосфатом калия DKDP, в сравнении с кристаллическими порошками KDP [1] и DKDP. Измерения проводились с использованием датчиков широких линий и при вращении под магическим углом в широком температурном диапазоне от комнатной температуры до 90 К.

Для объемных материалов были обнаружены изменения формы и положения линии ЯМР ^{31}P , связанные с сегнетоэлектрическим фазовым переходом. Исходя из полученных данных, рассчитаны параметры тензора химического сдвига (ТХС): изотропный сдвиг, анизотропия, фактор ассиметрии. При температуре сегнетоэлектрического фазового перехода положение линии сдвигалось в сторону низких частот, а также наблюдался скачок анизотропии ТХС и её увеличение при дальнейшем понижении температуры. Измерения MAS ЯМР ^{31}P позволили выявить плавное уменьшение изотропного сдвига при понижении температуры для объемного DKDP.

В образцах на основе пористого стекла с внедрённым KDP и опала с внедрённым DKDP сегнетоэлектрический фазовый переход не наблюдался в рабочем диапазоне температур. Это следует из сохранения формы линии, характерной для параэлектрической фазы. Примеры MAS-спектров для частиц DKDP в опале показаны на рисунке 1.

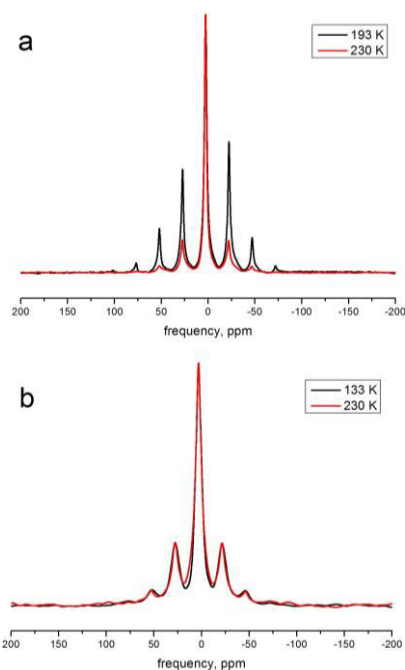


Рис. 1. MAS-спектры при двух температурах: а – порошковый DKDP, б – DKDP, внедрённый в опал с диаметром силикатных шаров 220 нм

ЛИТЕРАТУРА

1. Ускова Н.И., Подорожкин Д.Ю., Чарная Е.В., Нефедов Д.Ю., Барышников С.В., Бугаев А.С., Lee M.K., Chang L.J., ФТТ **58**, 667 (2016).

Широкополосная диэлектрическая спектроскопия релаксоров $\text{Pb}(\text{Fe}_{1-x}\text{Sc}_x)_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$

**Чучупал С.В.¹, Командин Г.А.¹, Степанов А.В.², Буш А.А.²,
Спектор И.Е.¹, Породинков О.Е.¹, Гончаров Ю.Г.¹, Серегин Д.С.²**

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, Россия
(E-mail: MirrorMan@yandex.ru)

²Московский технологический университет, МИРЭА, Москва, 119454, Россия

Система твердых растворов $\text{Pb}(\text{Fe}_{1-x}\text{Sc}_x)_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ (PFSW) относится к структурному семейству перовскита. В области температур 150-200 К система PFSW демонстрирует релаксорное поведение. Предполагается, что это соединение наряду с высокой диэлектрической проницаемостью может обладать также и магнитоэлектрическими свойствами. Известно, что доминирующая роль в формировании электродинамических характеристик перовскитов ABO_3 принадлежит катиону В [1].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование широкодиапазонной функции диэлектрического отклика в области концентраций Sc от 10 до 80%. На рис. 1 представлены спектры диэлектрического отклика системы PFSW, полученные объединением результатов импедансометрических измерений с данными монохроматической субмиллиметровой спектроскопии и инфракрасной Фурье-спектроскопии. Сильная размытость по частоте спектров диэлектрического отклика релаксоров непосредственно связана с ангармонизмом колебаний кристаллической решетки. Определение параметров полос поглощения такого сложного спектра потребовало применения многопараметрической факторизованной модели дисперсии. Описание низкочастотной области дисперсии традиционно выполняется на основе модифицированных моделей Дебаевской релаксации [2]. Для оценки влияния низкочастотного вклада в диэлектрическую проницаемость на параметры колебательного спектра был выполнен анализ дисперсии во всем рабочем частотном диапазоне от 120 Гц до 120 ТГц ($\sim 10^{-10} \text{ см}^{-1} - 4000 \text{ см}^{-1}$) в рамках факторизованной модели. Учет низкочастотной поляризации дает возможность анализировать температурную эволюцию параметров сильно ангармоничного колебательного спектра материалов с высокой диэлектрической проницаемостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований: гранты № 16-02-00223 и № 15-02-04647; Министерства образования и науки РФ (проект №734 Гос. задания).

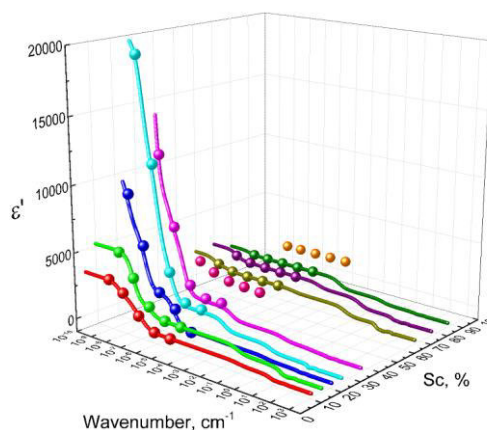


Рис. 1. Спектры диэлектрической проницаемости системы PFSW. Точки – данные импедансометрических измерений, линии – расчет по факторизованной модели дисперсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. I.M. Reaney, J. Petzelt, V.V. Voitsekhovskii, F. Chu, N. Setter J. Appl. Phys **76**, 4 (1994).
2. A.K. Jonscher. Nature **267**, 673 (1977).

Исследование собственных дефектов кристаллов LiTaO_3 методом ЯМР ${}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}$

Яценко А.В.¹, Палатников М.Н.², Сидоров Н.В.²

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, 3952007, Россия (E-mail: lab2@crimea.edu)

²Институт химии и технологии редкоземельных элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, 184209, Россия

Кристаллы LiTaO_3 (ТЛ) и LiNbO_3 (НЛ) являются сегнетоэлектрическими материалами, которые широко применяются в современных акустоэлектронных, электрооптических, акустооптических, и нелинейно-оптических устройствах [1]. Считается, что реальный состав номинально беспримесных нестехиометрических кристаллов НЛ и ТЛ описывается моделью литиевых вакансий, в соответствии с которой структурная формула кристаллов ТЛ принимает следующий вид: $[\text{Li}_{1-5x}\text{Ta}_x\text{V}_{4x}][\text{Ta}]\text{O}_3$ где для кристалла конгруэнтного состава $x \sim 0.0083$. Однако возможные реализации дефектной структуры кристаллов ТЛ до настоящего времени не исследованы, в отличие от НЛ, в котором предполагается наличие дефектных комплексов $(\text{Nb}_{\text{Li}}^{5+} + 4\text{V}_{\text{Li}})$, где $\text{Nb}_{\text{Li}}^{5+}$ - ион ниобия, находящийся в позиции Li, а V_{Li} – вакансии лития, расположенные вблизи $\text{Nb}_{\text{Li}}^{5+}$ [2].

Целью настоящей работы является установление типа собственных дефектов кристаллов ТЛ путем экспериментального исследования монокристаллического образца конгруэнтного состава методом ЯМР ${}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}$ и проведения моделирования соответствующих спектров для различных конфигураций дефектной структуры на основании электростатической модели ТЛ [3].

Было установлено, что спектр ЯМР ${}^7\text{Li}$ в ТЛ имеет более сложный вид, чем предполагалось ранее [4-6]. На основании сравнения параметров экспериментальных спектров ЯМР ${}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}$ и спектров, рассчитанных для различных вариантов реализации дефектной структуры ТЛ делается вывод о том, что наиболее вероятным типом дефектов, возникающими вследствие нестехиометрии, являются дефектные комплексы $(\text{Ta}_{\text{Li}}^{5+} + 4\text{V}_{\text{Li}})$ с конфигурацией, приведенной на рис.1. Ионы Ta_{Li} представлены черными кружками, V_{Li} – серыми.

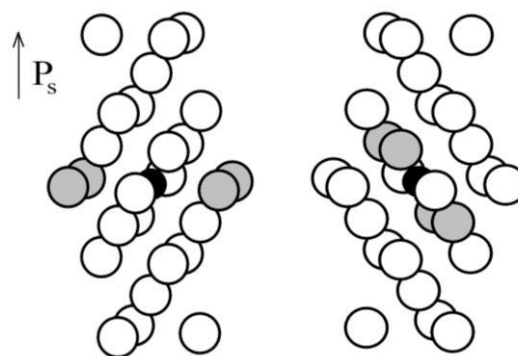


Рис.1. Наиболее вероятные конфигурации дефектных комплексов в кристалле ТЛ.

ометрии, являются дефектные комплексы $(\text{Ta}_{\text{Li}}^{5+} + 4\text{V}_{\text{Li}})$ с конфигурацией, приведенной на рис.1. Ионы Ta_{Li} представлены черными кружками, V_{Li} – серыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Volk T.R., Wöhlecke M. *Lithium Niobate. Defects, Photorefraction and Ferroelectric switching*. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 250p.
2. Gopalan V., Dierolf V., Scrymgeour D. *Annu. Rev. Mater. Res.* **37**, 449 (2007).
3. Яценко А.В., Кристаллография **62**, 115 (2017).
4. Peterson G.E., Bridenbaugh P.M., *J. Chem. Phys.* **48**, 3402 (1968).
5. Владимирцев Ю.В., Голенищев –Кутузов В.А., Ковпиллем У.Х. и др., ФТТ **10**, 3500 (1968).
6. Charnaya E.V., Kasperovich V.S., Palatnikov M.N. et al., *Ferroelectrics* **234**, 234 (1999).

Эффект фазопереходной усталости в трехкомпонентной системе $(1-x-y)\text{NaNbO}_3 - x\text{KNbO}_3 - y\text{Cd}_{0.5}\text{NbO}_3$

Андрюшин К.П., Андрюшина И.Н., Дудкина С.И., Резниченко Л.А.

Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: kprandryushin@gmail.com)

Основой большинства сегнетопьезокерамических материалов (СПКМ) являются свинецсодержащие сложные оксиды (ЦТС, PMN-PT и другие). Нацеленность на переход к экологически чистому производству является весьма актуальной. В связи с этим в последние годы идет активная работа по замене свинецсодержащих СПКМ на не содержащие свинец экологически чистые материалы-аналоги ЦТС. Одной из наиболее перспективных основ для бессвинцовых СПКМ является система твердых растворов (ТР) $\text{KNbO}_3\text{--NaNbO}_3$, имеющая высокие пьезоэлектрические характеристики.

Представляло интерес исследовать возможность использования материалов на основе твердых растворов (ТР) трехкомпонентной системы $(1-x-y)\text{NaNbO}_3 - x\text{KNbO}_3 - y\text{Cd}_{0.5}\text{NbO}_3$ в устройствах с многократным циклированием постоянного смещающего электрического поля (E). С этой целью ТР I разреза с $x=0.45$ подвергли четырехкратному циклированию E . Рис. 1 показывает, как сильно трансформировалась картина изменений относительной реверсивной диэлектрической проницаемости неполяризованных образцов (ϵ'/ϵ_0): уже после второго цикла зависимость $\epsilon'/\epsilon_0(E)$ приобрела куполообразный вид с максимумом в нулевом поле, характерный для сегнетоэлектриков релаксоров. Чтобы убедиться, действительно ли при таких полевых воздействиях возможно изменение характера проявления сегнетоэлектрических свойств, изучено термочастотное поведение рассматриваемого ТР до и после циклирования E . Таким образом, в нашем случае “полевое” циклирование привело, вероятно, к резкой активизации уже существующих дефектов (собственных-определяемых катион-анионным составом, биографических-связанных с процессами приготовления ТР), создающих исходную матрицу дефектов, а также возникновению (из-за механических напряжений, сопровождающих процессы “полевого” циклирования) новых нарушений структуры (деформационных дефектов), и к взаимодействию всех указанных типов несовершенств. Описанное явление весьма напоминает эффект фазопереходной усталости (фазового наклепа), наблюдаемой при многократных термоупругих мартенситных превращениях в металлах и сплавах (с обратимым движением межфазных границ), сопровождающихся накоплением внутренних искажений структуры, чаще всего, дислокаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (заявки №№ 3.6371.2017/БЧ, 3.6439.2017/БЧ), СП №3197.2016.3 и с использованием оборудования ЦКП «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИФ ЮФУ.

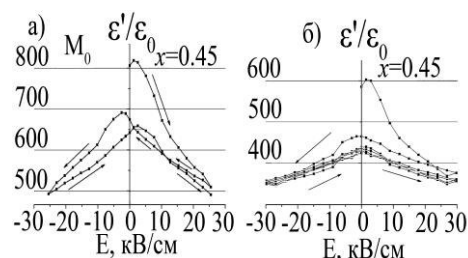


Рис. 1. Зависимости действительной части относительной реверсивной диэлектрической проницаемости неполяризованных образцов (ϵ'/ϵ_0) ТР I разреза от величины смещающего электрического поля. а)- до циклирования, б)- после циклирования.

Исследование электрокалорического эффекта в твердом растворе магнониобата свинца – цинкониобата свинца (PMZN)

Еськов А.В.¹, Анохин А.С.¹, Пахомов О.В.¹, Семенов А.А.², Буй М.Т.²

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), 197101,
Санкт-Петербург, Россия, (E-mail: asanokhin@corp.ifmo.ru)

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, Россия

Научно-техническое направление, связанное с разработкой и широким внедрением в практику компактных, экологически безопасных, экономичных и высоконадежных тепловых насосов и охладителей, работающих как в комнатных условиях, так и в области криогенных температур, чрезвычайно актуально в современном обществе. Среди разнообразных альтернативных технологий трансформаторов тепла большой интерес исследователей и разработчиков во всем мире привлекает возможность использования электрокалорического эффекта в твердотельных структурах [1,2]. Главной технической трудностью, стоящей на пути создания малогабаритных высокоэффективных твердотельных охладителей на электрокалорическом (ЭК) эффекте, является необходимость использования тепловых ключей для осуществления процесса отвода тепла от охлаждаемого объекта. Ранее в работах [3] были предложены принцип построения и термодинамический цикл работы электрокалорического охладителя без использования тепловых ключей. Принцип работы таких охлаждающих устройств основан на эффекте разницы величин электрокалорического эффекта в сегнетоэлектрических материалах при поляризации и деполяризации сегнетоэлектрического образца при одинаковой температуре. Однако, поиск материалов, обладающих не только значительными величинами электрокалорического эффекта, но и большой величиной разницы электрокалорического эффекта при поляризации и деполяризации, остается актуальной задачей [5]. К тому же подобные материалы должны обладать технологичностью для изготовления на их основе многослойных емкостных структур. В данной работе проведено экспериментальное исследование электрокалорического эффекта в твердом растворе магнониобата свинца – цинкониобата свинца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Valant M. // Progress in Materials Science. 2012. V. 57(6). P. 980-1009.
2. Ozbolt M., Kitanovski A., Tusek J., Poredos A. // International journal of refrigeration. 2014.V. 40. P. 174-188.
3. Karmanenko S., Semenov A., Dedyk A., Es'kov A., Ivanov A., Beliaevskiy P., Pakhomov O. New approaches to electrocaloric-based multilayer cooling. In Electrocaloric Materials. // Berlin Heidelberg. Springer. 2014. P. 183-223.
4. Еськов А.В., Белявский П.Ю., Анохин А.С., Пахомов О.В., Семенов А.А., Мильников И.Л., Никитин А.А., Буй М.Т., Черкасский М.А., Плотников В.В. Экспериментальное исследование электрокалорического отклика в сегнетоэлектрических материалах // Журнал технической физики - 2016. - Т. 86. - № 7. - С. 151-153

Появление зарядов на электродах сегнетокерамики при постоянной механической нагрузке

Картунова Е.М.¹, Бакулин П.А.¹, Жога Л.В.¹

¹Волгоградский государственный технический университет, институт архитектуры, и строительства, Волгоград, 400074, Россия (E-mail: Todestribe@yandex.ru)

Для практического использования сегнетокерамики с целью получения разности потенциалов при низкочастотных колебаниях механических конструкций вследствие действия ветровой нагрузки исследовалось возникновение заряда на электродах сегнетокерамической пластины, изогнутой постоянной силой методом осесимметричной нагрузки. Образцы изготавливались в заводских условиях по стандартной технологии. Механическая нагрузка поднималась ступенчато. Electrodes были замкнуты на сопротивление 2 МОм напряжение на котором измерялось вольтметром [1] в зависимости от времени, что позволяло рассчитывать заряд, возникающий вследствие пьезоэффекта. Получены зависимости прогиба пластины от действующей силы, заряда от силы и построены зависимости заряда от прогиба. После последней подгрузки образец оставался в течение 3-х часов под постоянной нагрузкой. Во время опыта все время измерялся прогиб. В работе обнаружено что через некоторое время, различное для каждого образца, на электродах появлялся заряд, изменяющийся во времени, величина которого значительно (для некоторых образцов на порядок превышала заряд, полученный в результате пьезоэффекта). Временная зависимость заряда представляла собой хаотический сигнал (см. рис.1). В работе показана возможность получения информации из хаотических временных сигналов методом фликкер-шумовой спектроскопии [2]. Были рассчитаны спектры плотности мощности сигналов. Количественные параметры, полученные из анализа спектров мощности $S(f)$ и переходных разностных моментов $\Phi^{(2)}(t)$, построенных на основе временных рядов, имеют смысл времен корреляции и параметров, характеризующих потерю корреляционных связей на этих временах корреляции для нерегулярностей типа «всплесков» и «скачков» токов. Связь между изменением заряда и процессами в поликристаллической сегнетокерамике позволила показать, что использованная методика исследования сегнетокерамики позволяет предложить процесс создающий ток в поликристаллической сегнетокерамике при постоянной механической нагрузке.

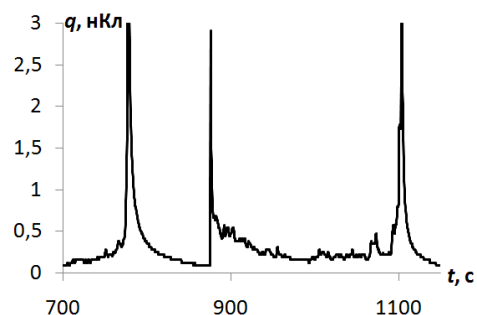


Рис. 1. Зависимость заряда от времени при постоянной механической нагрузке

ЛИТЕРАТУРА

1. Notingher P.V., Busoi S., Dimiitran L.M., Stancu C., etc WASET **25**, 648-654 (2009)
2. Тимашев С.Ф., Встовский Г.В. Электрохимия **39** №2, 149-162. (2003)

Пироэлектрическое преобразование тепловой энергии с использованием пассивных схем

Добросельский К.Г., Антипин В.А., Сухоруков Г.С.

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН Новосибирск, 630090, Россия
(E-mail: dobroselsky@mail.ru)*

В настоящее время актуальна проблема преобразования низкопотенциального тепла в электроэнергию. Пироэлектрический эффект является прямым способом переработки теплоты в электричество. Существуют пассивные и активные (цикл Ольсена) схемы пироэлектрической конверсии [1]. Термическая конверсия пироэлектрика без полевого смещения достаточно мала и составляет меньше 1%, цикл Ольсена позволяет увеличить коэффициент преобразования тепла выше 5% [1]. Однако, во многих случаях, пассивные схемы предпочтительней, так как не требуют дополнительной подачи напряжения и хорошо контролируемыми внешними условиями.

Для исследования пассивного преобразования тепла был создан экспериментальный стенд, где на оптической скамье располагались мишень из пироэлектрика (ЦТС) и лазер ИК-излучения мощностью 1 Вт. Изменение температуры образца в рабочем состоянии составляло порядка 3–4 °С.

На рис. 1 представлены пироотклики напряжения, полученные на ЦТС по схеме, подобной [2], для частот цикла нагрева/охлаждения $f = 0.1, 0.05$ Гц. На рис. 2 приведены пироотклики тока короткого замыкания по схеме, подобной [3], с учетом сопротивления цепи, для тех же частот, что указаны выше.

Удельные энергии, полученные при пироконверсии, составили $N \approx 0.8$ и 1.8 Дж/л за период при частотах $f = 0.1$ и 0.05 Гц соответственно. Термический КПД при этом был $\eta_T \approx 0.01$ %. Несмотря на небольшие значения удельной энергии и КПД, энергия, вырабатываемая пироэлектрическим устройством в течение большого количества циклов, может накапливаться и использоваться в качестве автономного источника.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 16-19-00119.

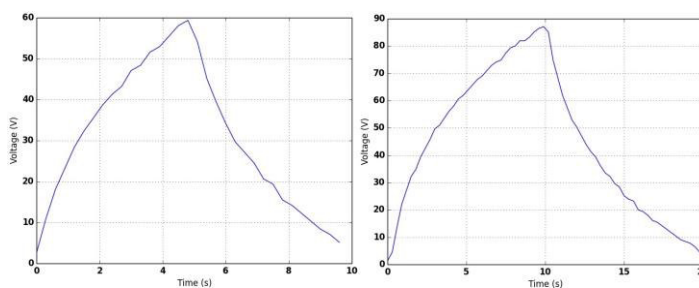


Рис. 1. Профили напряжения для одного периода.

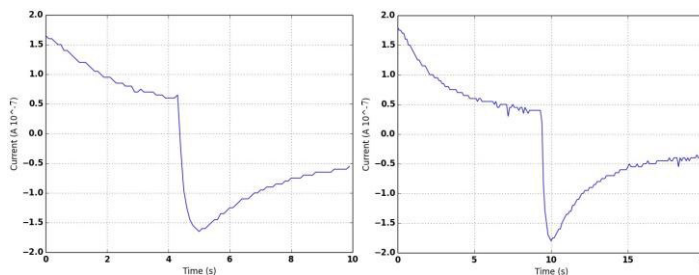


Рис. 2. Профили пиротока для одного периода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bowen C. R., Taylor J., LeBoulbar E. et al., Energy & Environmental Science **7**, 3836 (2014).
2. Xie J., Mane X.P., Green C.W. et al., Journal of Intelligent Material Systems and Structures **21**, 243 (2010).
3. Cuadras A., Gasulla M., and Ferrari V. Sensors and Actuators A **158**, 132 (2010).

Бидоменный сегнетоэлектрический кантилевер для сбора бросовой механической энергии

**Кислюк А.М., Савченко А.Г., Малинкович М.Д., Быков А.С.,
Кубасов И.В., Пархоменко Ю.Н., Жуков Р.Н., Киселев Д.А.**

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» Москва,
119991 ГСП-1, Россия (E-mail: akislyuk94@gmail.com)*

Бросовой (англ. waste energy) называют энергию, которая в обычных условиях выбрасывается впустую при работе различных промышленных устройств и хозяйственной деятельности человека в целом. Подсчеты показывают, что более половины потребляемой в развитых странах электроэнергии выбрасывается в виде тепла и вибраций [1] (в странах с низким уровнем развития этот показатель, очевидно, гораздо выше). С развитием промышленности возрастает количество источников бросовой механической энергии, в частности низкочастотных (менее 1000 Гц) вибраций.

Одновременно с этим возрастает энергоэффективность устройств, появляются маломощные электронные приборы и датчики, способные питаться от источников мощностью в сотни нВт, а также совершенствуются накопители электроэнергии (аккумуляторные батареи и суперконденсаторы), развиваются нанотехнологии, что требует создания эффективных маломощных источников электропитания. Создание материалов и приборов, способных преобразовывать неостребованные вибрации в электроэнергию, является очевидным решением как проблемы утилизации бросовой механической энергии, так и проблемы питания маломощных, а также микро- и наноразмерных приборов и устройств.

Настоящая работа посвящена созданию и исследованию электрического генератора для сбора бросовой механической энергии с высокоэффективным механоэлектрическим пьезопреобразователем на основе консольно закрепленной пластины из бидоменного монокристалла ниобата лития. Предложена оригинальная методика получения кристаллов с сегнетоэлектрической структурой «голова-к-голове» и «хвост-к-хвосту». Разработана конструкция генератора и электронная схема съема и накопления заряда.

Высокая эффективность преобразования вибрационной энергии в электричество является следствием монокристаллического строения бидоменных структур. Как следствие, минимизированы потери энергии на межзеренное трение, гистерезис и крип, а отсутствие клеевых соединений позволяет использовать генератор для сбора бросовой механической энергии при повышенных температурах.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы») (ID проекта RFMEFI58716X0035).

ЛИТЕРАТУРА

1. Nguyen H., Navid A., Pilon L, Applied thermal engineering, **30**, 14, 2127 (2010).

Прибор для быстрого измерения и анализа спектров импеданса пьезоматериалов

Кондаков Е.В.¹, Павленко А.В.² Иванов Н.М.¹

¹НКТБ Пьезоприбор Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, 344090, Россия (E-mail: evg_kv@mail.ru)

²Южный научный центр РАН Ростов-на-Дону, 344006, Россия

Измерения в импедансной спектроскопии традиционно выполняются анализаторами импеданса последовательно для каждой из частот заданного диапазона. При этом время измерения определяется не только характеристиками анализатора, но и свойствами образца, поскольку на каждой частоте необходимо установление колебаний. Если, например, требуется изучить поведение спектра в диапазоне температур, то длительность измерений может оказаться неприемлемо большой при непрерывно меняющейся температуре.

В работе описываются результаты применения оригинального прибора "Цензурка-МА2" [1], использующего импульсное возбуждение исследуемого образца широкополосным сигналом. В отличие от традиционного "последовательного" алгоритма, измерение всех компонент спектра происходит одновременно, а длительность измерения определяется лишь требуемым разрешением по частоте. Быстрое измерение спектра позволяет проводить его даже при постоянно меняющихся свойствах образца.

Аппроксимацией комплексного спектра в окрестностях резонансов прибором определяются их частоты, механические добротности и сопротивления на резонансе. Ёмкость и тангенс угла диэлектрических потерь на низкой частоте определяется прямым вычислением.

На рисунке приведён результат измерения временных зависимостей ёмкости, резонансной частоты обертона и его добротности в процессе охлаждения образца из материала $\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ в диапазоне температур от комнатной до температуры жидкого азота и обратного нагрева. В отличие от монотонного изменяющихся с температурой ёмкости и резонансной частоты, обращает на себя внимание существенно немонотонное поведение механической добротности.

Проведённые предварительные измерения подтвердили возможность быстрого измерения спектров импеданса, что открывает более широкие возможности экспериментального исследования поведения пьезоэлектрических характеристик в широком интервале внешних воздействий (температура, давление и пр.), которые при использовании традиционных анализаторов импеданса были сильно затруднены.

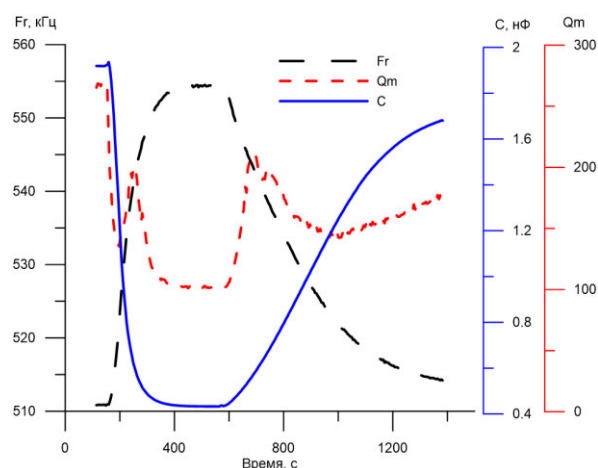


Рисунок. Временные зависимости ёмкости C , резонансной частоты F_r и механической добротности Q_m керамики $\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ при охлаждении от 300 К до 77 К и обратном нагреве

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2584719 РФ. Е.В. Кондаков, Н.М. Иванов, Ю.К. Милославский.

Перспективный высокотемпературный сенсор вибрации, колебаний и пульсаций на основе монокристаллического ниобата лития

**Кубасов И.В., Быков А.С., Малинкович М.Д., Кислюк А.М.,
Пархоменко Ю.Н., Темиров А.А., Киселев Д.А.**

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва,
119991 ГСП-1, Россия (E-mail: kubasov.ilya@gmail.com)*

Непрерывное развитие высокотехнологичных секторов экономики, таких как авиакосмическая техника, автомобилестроение, нано- и микроэлектроника, специальная техника (в том числе системы безопасности и контроля), гражданское и военное строительство, определяет возрастающие потребности в устройствах, способных детектировать вибрации, колебания и пульсации в агрессивных температурных условиях (повышенные или пониженные температуры) с высокой точностью. В наши дни функционирование большинства датчиков вибрации основано на использовании пьезоэлектрического или оптического (интерферометрического) методов преобразования механической энергии в электрическую. В то время как оптические сенсоры вибраций являются довольно сложными и громоздкими и чаще используются для высокоточных измерений, датчики на основе пьезоэлектриков являются более простыми, дешевыми и надежными, что позволяет применять их для решения широкого спектра задач.

Одновременно с этим, создание датчика регистрации вибраций при высоких температурах (более 400 °С) сталкивается с рядом проблем, не позволяющих создать высокочувствительный пьезоэлектрический преобразователь. В частности, подавляющее большинство материалов с высокими пьезоэлектрическими коэффициентами являются сегнетоэлектриками с низкой температурой Кюри, теряющими свои пьезоэлектрические свойства выше 300 – 350 °С.

В настоящей работе предложена конструкция и технологический прием изготовления высокотемпературного сенсора вибрации, колебаний и пульсаций с чувствительным элементом, изготовленным из бидоменного монокристалла ниобата лития. Некоторые методики получения таких бидоменных кристаллов были описаны ранее [1-3]. Основными преимуществами бидоменных кристаллов является возможность работы по биморфному принципу при отсутствии клеевых слоев или межзеренных границ. Являясь высокотемпературным сегнетоэлектриком, ниобат лития демонстрирует температурную стабильность пьезоэлектрических свойств в широком интервале температур, а преобразователи на его основе не имеют гистерезиса и крипа, что позволяет изготавливать прецизионные высокотемпературные датчики вибрации с линейными и хорошо воспроизводимыми характеристиками.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы») (ID проекта RFMEFI57816X0187).

ЛИТЕРАТУРА

1. Nakamura K., Ando H. and Shimizu H., Appl. Phys. Lett. **50**, 1413 (1987).
2. Antipov, V. V., Bykov, A. S., Malinkovich, M. D. et al., Ferroelectrics, **374**, 65 (2008).
3. Bykov, A. S., Grigoryan, S. G., Zhukov, et al. Russ. Microelectron. **43**, 536 (2014).

Кристаллическая структура, физические свойства и особенности применения сегнетокерамик на основе ЦТС с контролируемой пористостью

**Макарьев Д.И., Константинов Г.М., Швецова Н.А., Швецов И.А.,
Рыбьянец А.Н.**

*Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону,
пр. Стачки, 194 (E-mail: dmakarev@rambler.ru)*

Актуальность комплексных исследований новых сегнетоактивных и композиционных материалов определяется не только диктуемыми потребностями современной техники, практической значимостью создания и исследования новых и совершенствования существующих материалов, но также и нерешенными фундаментальными проблемами, такими как взаимосвязь состава, условий получения, кристаллической микроструктуры, связности и электрофизических свойств, определяющих функциональные параметры пространственно-неоднородных сегнетоактивных материалов.

Целью настоящей работы являлось исследование кристаллической структуры, микроструктурных особенностей, физических свойств и областей применения сегнетокерамик на основе ЦТС с контролируемой пористостью. Были получены и исследованы пористые сегнетопьезокерамики на основе сегнетомягких и сегнетожестких составов системы ЦТС (ПКР-78, ПКР-1, ЦТС-19) с различной пористостью. Образцы пористых сегнетопьезокерамик получались методом обычного спекания с использованием органического поробразователя. Комплексные упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические параметры экспериментальных образцов определялись с помощью метода анализа пьезорезонансных спектров и программного пакета PRAP. Микроструктурные исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа (НИТАСНИ ТМ 1000) и оптического микроскопа (NeoPhot-21). Структурные параметры экспериментальных образцов определялись с помощью рентгеновского дифрактометра Дрон 7. Проведен критический анализ и сравнение экспериментальных результатов с результатами теоретических и модельных расчетов. Обсуждены результаты экспериментальных исследований и корреляционных связей кристаллической структуры, микроструктурных особенностей, условий получения и электрофизических свойств пористой СПК. В результате выполненных исследований показано, что характер зависимостей упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических свойств пористой сегнетопьезокерамики от пористости определяется микроструктурными особенностями пьезокерамического каркаса, обусловленными технологическими режимами получения пористой керамики. Рассмотрены существующие и перспективные области применения пористых сегнетопьезокерамик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rybyanets A.N. In: *Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics.* **175**, Chapter 15, 211 (2016).

Возможность использования смесевых композитов системы «пьезокерамика – полимер» в качестве цифровых материалов для аддитивных технологий

Макарьев Д.И., Луговая М.А., Резниченко А.Н., Рыбьянец А.Н.

Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194 (E-mail: dmakarev@rambler.ru)

Использование аддитивных технологий при изготовлении пьезоэлементов или изделий на их основе представляется перспективным, поскольку их размеры и форма удобны для объемной печати. Из множества аддитивных технологий [1], наиболее подходящими для объемной печати, на наш взгляд, представляются технологии селективного лазерного спекания, сверхзвукового напыления, послойного склеивания, облучения фоторезиста ультрафиолетом. Суть технологии послойного склеивания заключается в последовательном нанесении слоев порошка, которые склеиваются в нужных местах полимерным клеем. Клей наносится из картриджа, который доставляется в нужное место при помощи программируемой трехкоординатной механической системы. Если в качестве порошка использовать частицы пьезокерамики, то в результате получим смесевой композит системы «пьезокерамика-полимер». Однако такой композит практически невозможно поляризовать из-за огромной разности диэлектрических проницаемостей пьезокерамики и полимера. Частично обойти создавшуюся ситуацию удалось путем создания однослойного композита [2], в котором исходный размер частиц пьезокерамики превышал конечный размер пьезоэлемента. В этом случае, после механической обработки у частиц появляются взаимно параллельные плоскости, которые являются частями противоположных сторон пьезоэлемента. Если на них нанести электрод, то между электродами появятся области пьезокерамики, лишенные полимерных прослоек, что позволяет поляризовать такой элемент. Но подобный способ создания пьезоэлементов не в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к аддитивным технологиям. Для преодоления гигантской разности диэлектрических проницаемостей составляющих композита «пьезокерамика–полимер» нами предложено в качестве материала матрицы композита использовать полупроводящий полимер. В этом случае напряженность поляризующего поля для частиц пьезокерамики в композите будет определяться не отношением диэлектрических проницаемостей пьезокерамики и полимера, а падением электрического потенциала в полимерной прослойке между пьезокерамическими частицами. При этом проводимость полимерной матрицы должна быть такой, чтобы, с одной стороны, обеспечить низкий уровень тангенса диэлектрических потерь пьезоэлемента, с другой – достаточно высокую проводимость полимера в тонком слое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макарьев Д.И., Рыбьянец А.Н. Труды конференции ВКС-ХХ. 377 (2014).
2. Макарьев Д.И., Рыбьянец А.Н., Маяк Г.М. Письма в ЖТФ **41**, Выпуск 7, 22 (2015).

Пьезоактивные и ультразвуковые обратноосмотические, ультра- и микрофльтрационные мембраны с улучшенной селективностью и производительностью

Рыбьянец А.Н., Науменко А.А., Швецова Н.А., Щербинин С.А.

*Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки,
194 (E-mail: arybyanets@gmail.com)*

Баромембранные процессы используются во многих отраслях народного хозяйства и в лабораторной практике для опреснения соленых и очистки сточных вод, (обратный осмос), выделения и очистки биологически активных веществ (ультрафильтрация), очистки технологических растворов и воды от тонкодисперсных веществ (микрофльтрация). Основными недостатками существующих баромембранных технологий и устройств являются низкая селективность и производительность и, в ряде случаев, их высокая стоимость. Кроме того, все существующие в настоящее время мембраны, используемые в баромембранных процессах, являются принципиально пассивными и, в ряде случаев, неэффективными для новых перспективных областей применения.

Целью настоящей работы являлась разработка и исследование нового поколения пьезоактивных и ультразвуковых обратноосмотических, ультра- и микрофльтрационных мембран с улучшенной селективностью и производительностью.

В результате выполненных работ изготовлены:

1. Новые пьезоактивные, в том числе биосовместимые микро- и нанопористые материалы, а также пьезоактивные и ультразвуковые мембраны на их основе.
2. Конструкции гибридных и композиционных пьезоактивных и ультразвуковых мембран и фильтров.
3. Макетные образцы пьезоактивных и ультразвуковых мембран с улучшенной селективностью и производительностью.

Представлены результаты исследований микро- и нанопористых пьезоподложек, пьезоактивных нанопористых селективных слоев, гибридных и композиционных пьезоактивных и ультразвуковых мембран.

Разработанные пьезоактивные и ультразвуковые обратноосмотические, ультра- и микрофльтрационные мембраны, а также фльтрационные устройства на их основе могут быть использованы для фльтрации питьевой воды в системах водоподготовки, очистки сточных промышленных вод и извлечения тяжелых металлов и радионуклидов из сбросов предприятий химического и ядерно-топливного цикла, фльтрации органических и пищевых жидкостей, очистке нефтепродуктов, биологических сред (гемодиализ), генетических анализов и др. применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krinks, J.K., Qiu, M., Mergos, I.A., Weavers, L.K., Mouser, P.J., Verweij, H. *Journal of Membrane Science*. **494**, 130 (2015).

Конструкция для приложения электрического поля к образцу при проведении экспериментов по рассеянию рентгеновского излучения

Удовенко С.А.¹, Андроникова Д.А.^{1,2}, Вахрушев С.Б.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Россия, (E-mail: s_udovenko@mail.ru)

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Санкт-Петербург, 194021, Россия

Разработана миниатюрная конструкция для приложения электрического поля к образцу при проведении экспериментов по рассеянию рентгеновского излучения. Размеры конструкции позволяют проводить эксперимент как на синхротронном источнике, так и на небольшом лабораторном дифрактометре. При создании конструкции были учтены следующие требования: высота не более 30 мм, ширина не более 16 мм, стойкость к нагреву до температур 500°C, обеспечение максимальной теплопередачи от нагревателя к кристаллу, обеспечение надежного электрического контакта между образцом и электродами, электродами и источником напряжения, устойчивость к электрическому пробую при напряжениях до 1000В, обеспечение возможности

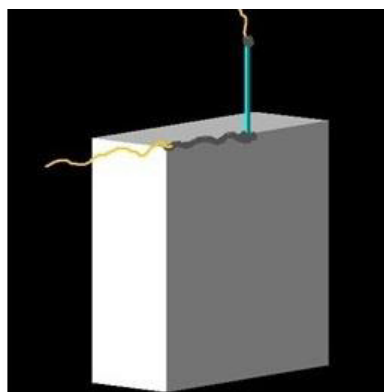
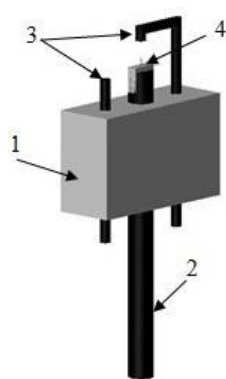


Рис 1. Общий вид конструкции (слева), увеличенное изображение подложки с образцом (справа)

производить сканирование рентгеновским лучом в максимально возможном диапазоне углов. На рисунке 1 показан внешний вид предложенной конструкции. Основными элементами конструкции являются: изолятор – 1, изготовленный из стекла, крепежный стержень – 2, выполняющий функцию горячего пальца, электроды – 3, выполненные из молибдена, подложка с образцом – 4, представляющая собой пластину из лейкосапфира, изолирующая нижний электрод от крепежного стержня. Материалы конструкции подобраны с учетом их температурного расширения, электрической проводимости, диэлектрических свойств, теплопроводности. В ближайшее время будут проведены первые эксперименты по рассеянию рентгеновского излучения на кристаллах цирконата-титаната свинца (ЦТС), в докладе будут представлены результаты измерений.

Емкостный дилатометр на базе измерительного комплекса PPMS QD для измерений КЛТР, магнитострикции и пьезоэлектрического эффекта

Фрейдман А.Л., Попков С.И.

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН Красноярск, 660036, Россия
(E-mail: fss4@yandex.ru)*

Деформация вещества, вызванная изменением внешних условий, отражает многие процессы, происходящие на уровне элементарной ячейки и межатомных взаимодействий. Так, например, при фазовых переходах моно- и поликристаллических соединений сложно установить процессы, происходящие внутри элементарной ячейки методами рентгено- и нейтронографических измерений, однако результатом этих преобразований является общая деформация образца, которую можно зафиксировать методами дилатометрии непосредственно в точке фазового перехода и ее окрестностях. По этой причине список публикаций по теме разработок в области измерений малых деформаций пополняется и по настоящий день [1,2].

Актуальность построения новых экспериментальных установок также обусловлена появлением новых задач перед измерительной техникой. Примером этого могут служить мультиферроики, где упругие взаимодействия играют важную роль. Имея образец, который проявляет значительные магнитострикционные свойства и одновременно является пьезоэлектриком, возможно индуцирование электрической поляризации посредством магнитного поля. Имея сложные связи между различными типами деформаций необходимы измерительные установки, которые могли бы проводить измерения в широком спектре внешних условий. Так, для мультиферроиков важно проводить измерения относительной деформации вызванной влиянием температуры, магнитного и электрического полей. Кроме того представляет интерес поведение относительной деформации при приложении и магнитного и электрического полей одновременно. Описания таких измерительных установок не было найдено в литературе.

В данной работе разработана емкостная дилатометрическая ячейка (см. рис. 1) для проведения измерений коэффициента линейного теплового расширения, магнитострикции и пьезоэлектрического эффекта. Конструкция ячейки позволяет использовать ее в составе измерительного комплекса PPMS QD и разработана для образцов толщиной до 10 мм. Возможно проведение измерений малых деформаций, вызванных влиянием внешнего электрического и магнитного полей, а так же температуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-48-243040 p_мол_a.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Küchler, T. Bauer, M. Brando et al. Rev. Sci. Instrum 83, 095102 (2012).
2. G. M. Schmiedeshoff, A. W. Lounsbury, D. J. Luna et. al. Rev. Sci. Instrum. 77, 123907 (2006).



Рис. 1. Внешний вид дилатометрической ячейки.

Численное моделирование и оптимизация акустических полей и конструкций фокусирующих ультразвуковых преобразователей высокой интенсивности

**Швецов И.А., Астафьев П.А., Мойса М.О.,
Щербинин С.А., Рыбьянец А.Н.**

*Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону,
пр. Стачки, 194 (E-mail: wbeg@mail.ru)*

Недавние успехи в области физической акустики, методов визуализации и обработки изображений, пьезоэлектрических материалов и конструкций ультразвуковых преобразователей привело к появлению новых методов и аппаратуры для ультразвуковой диагностики, терапии и эстетической медицины, а также развитию традиционных и появлению новых областей применения [1]. Одним из перспективных применений пьезокерамических и композиционных материалов являются ультразвуковые преобразователи для медицинской диагностической аппаратуры, в частности, фокусирующие преобразователи высокой интенсивности (HIFU).

Настоящая статья посвящена разработке математических моделей, численному моделированию и оптимизации акустических полей и конструкций фокусирующих ультразвуковых преобразователей высокой интенсивности на основе пористой сегнетопьезокерамики. В статье описана технология изготовления пористых пьезокерамических материалов и крупногабаритных пьезоэлементов сложной формы. Изготовлены и исследованы сферически фокусирующие пьезоэлементы с различными электрофизическими и геометрическими параметрами. Выполнены моделирование, расчет и оптимизация акустических полей и элементов конструкции HIFU преобразователей, разработаны и изготовлены макетные образцы диагностических и силовых фокусирующих ультразвуковых преобразователей. Проведены измерения пьезокерамических материалов, пьезоэлементов и фокусирующих ультразвуковых преобразователей.

В результате выполненных исследований установлено, что использование сегнетожесткой пористой пьезокерамики в HIFU преобразователях имеет существенные преимущества по сравнению с плотной пьезокерамикой и другими композиционными материалами. Эти преимущества обусловлены высокой технологичностью, лучшим акустическим согласованием с биологическими тканями, отсутствием паразитных мод колебаний и высокой электромеханической эффективностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rybyanets A.N. *In: Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. Nova Science Publishers Inc. 2012. Chapter 5, 143 (2012).*

Пироэлектрические свойства тонких пленок титаната бария-стронция

Широков В.Б.^{1,2}, Разумная А.Г.², Юзюк Ю.И.²

¹Южный научный центр РАН, 344006, Ростов-на-Дону, Россия
(E-mail: shirokov-vb@rambler.ru)

²Южный Федеральный Университет, 344090, Ростов-на-Дону, Россия

Исследованы пироэлектрические свойства тонких пленок твердого раствора $\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ (BST07). Изучены особенности поведения пироэлектрического коэффициента при действии вынужденной деформации (misfit strain), появляющейся в результате влияния подложки и при действии электрического поля, направленного в плоскости пленки, E_x , и по нормали к подложке, E_z . Рассмотрение выполнено для монокристаллической монокристаллической пленки, расположенной на (001) срезе кубической подложки.

Для твердого раствора с $x=0.7$ ротационный параметр порядка (ПП), связанный с поворотами октаэдров, можно не учитывать, а ограничиться только ПП поляризации. При комнатной температуре в нулевом внешнем поле в зависимости от величины вынужденной деформации u_m пленка BST07 может находиться в c -фазе при $u_m < -0.381 \times 10^{-3}$, в aa -фазе при $u_m > 0.42 \times 10^{-3}$ и в параэлектрическом состоянии при промежуточных значениях деформации $-0.381 \times 10^{-3} < u_m < 0.42 \times 10^{-3}$. В этом состоянии спонтанная поляризация равна нулю, и, следовательно, отсутствует пироэлектрический эффект. Под действием поля появляется индуцированная поляризация и пироэлектрический коэффициент, отличный от нуля. Поведение пирокоэффициента (его абсолютное значение) в области значений вынужденной деформации, соответствующих параэлектрической фазе, показано на рис.1. Как видно из рисунка, пирокоэффициент при изменении внешнего поля начинает увеличиваться от нуля до некоторого максимального значения. По мере дальнейшего увеличения поля пирокоэффициент уменьшается. При приближении величины вынужденной деформации к левому граничному значению (c -фаза) амплитуда изменения пирокоэффициента под действием поля E_z увеличивается. При приближении величины вынужденной деформации к правому граничному значению (aa -фаза) увеличивается амплитуда изменения пирокоэффициента под действием поля E_x .

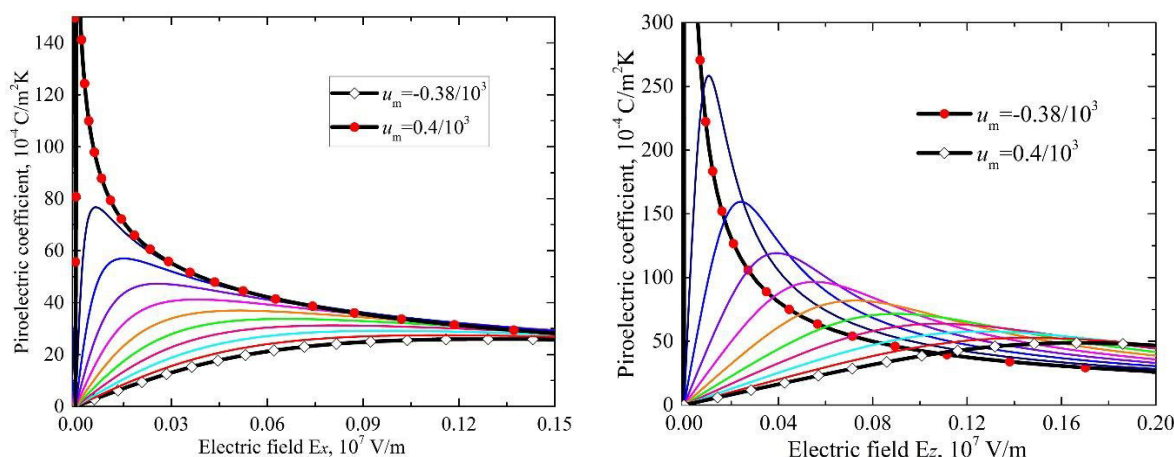


Рис.1 Зависимость пироэффекта от поля E_x в плоскости пленки BST07 (слева) и E_z по нормали к плоскости (справа) для разных значений вынужденной деформации (равномерный шаг).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-12-00258).

Конечно-элементное моделирование и экспериментальное исследование цилиндрических фокусирующих пьезопреобразователей

**Щербинин С.А., Лукьянов И.И., Наседкин А.В., Швецов И.А.,
Рыбьянец А.Н.**

*Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки,
194 (E-mail: step_scherbinin@list.ru)*

В связи с растущим потреблением нефти и постепенным истощением разведанных месторождений, все более востребованными становятся тяжелые сорта нефти, обладающие высокой вязкостью, что обуславливает значительные технические трудности, сопряженные с добычей и транспортировкой таких сортов. Перспективным способом преодоления этих трудностей представляется обработка тяжелых нефтей ультразвуком высокой интенсивности [1].

Настоящая работа посвящена изучению возможности создания высокоинтенсивных ультразвуковых полей внутри цилиндрического объема, заполненного вязкой жидкостью, с использованием кольцевых пьезоэлектрических преобразователей, поляризованных по радиусу (рис. 1). С помощью теоретического анализа были установлены условия возникновения стоячих цилиндрических волн внутри исследуемого объема. Посредством численных экспериментов, проведенных в универсальном программном комплексе конечно-элементного моделирования ANSYS [2] были оптимизированы геометрические параметры пьезопреобразователя для достижения высокой интенсивности акустического поля внутри облучаемого объема нефти и максимальной эффективности исследуемого кольцевого излучателя.

В работе также проведена экспериментальная валидация вышеуказанных аналитических результатов и результатов компьютерных симуляций. Изготовлены и исследованы цилиндрические пьезокерамические элементы различных размеров. Измерены импедансные спектры и определены собственные частоты различных мод колебаний, а также параметры цилиндрических пьезоэлементов. Выполнены измерения акустических полей цилиндрических ультразвуковых преобразователей в жидких средах с различной динамической вязкостью.



Рис. 1. Кольцевой ультразвуковой преобразователь, изготовленный из керамики ЦТС - 19.

ЛИТЕРАТУРА

1. Makarev D.I., Rybyanets A.N., Sukhorukov V.L. Indian Journal of Science and Technology **9**, I. 29, 334 (2016).
2. <http://www.ansys.com>

Пути создания высокостабильного пьезокерамического материала для пьезокерамических устройств

Щёголева Т.В., Шахворостов Д.Ю.

АО «Научно-исследовательский институт «Элма» с опытным производством»,
г. Москва, г. Зеленоград, 124460, Россия (E-mail: shogolevatv@mail.ru)

Одной из основных особенностей пьезокерамических фильтров, формирующих амплитудно-частотные характеристики трактов промежуточной частоты амплитудно-модулированных сигналов на 450÷500 кГц, является то, что требования по эксплуатации к ним в температурном диапазоне являются достаточно жёсткими: от минус 60 °С до +85 °С [1]. Поэтому при проектировании фильтров предпочтение отдают пьезокерамическим материалам с наилучшими температурными характеристиками, т.е. минимальным относительным отклонением частоты в диапазоне рабочих температур.

Исследование заключалось в варьировании режимов спекания порошков трёх типов пьезокерамических материалов ЦТС-38, ЦТС-39, ЦТС-40 (узкополосного, среднеполосного и широкополосного) и анализе полученных результатов. Стандартные блоки из порошков материала ЦТС-38 спекались при температуре 1100 °С и 1120 °С, из порошков материала ЦТС-39 – 960 °С, 1100 °С и 1120 °С, из порошков материала ЦТС-40 – 1100 °С и 1120 °С. Время спекания 4 часа. Значения относительного отклонения частоты для полученных материалов показаны на диаграмме (рис. 1).

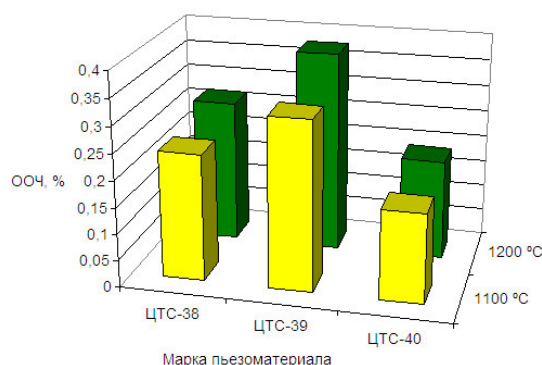


Рис.1. Значения ООЧ для трёх пьезо-керамических материалов

Из проведенного анализа следует, что минимальным ООЧ обладают пьезоэлементы из порошков материала ЦТС-40, которые были применены при изготовлении пьезокерамических фильтров, параметры которых исследовались в температурном диапазоне от минус 60 °С до +85 °С. На рис.2 показана зависимость рабочих частот для двух фильтров, собранных из пьезоэлементов, изготовленных из исследуемого материала [2]. Техническим требованием к пьезокерамическим фильтрам подобного типа установлено значение рабочей частоты в диапазоне температур равное $500,0 \pm 2,5$ кГц и как видно из рис. 2 фильтр 1 и фильтр 2 имеют отклонение рабочей частоты от номинального значения не превышающее 2,1 кГц.

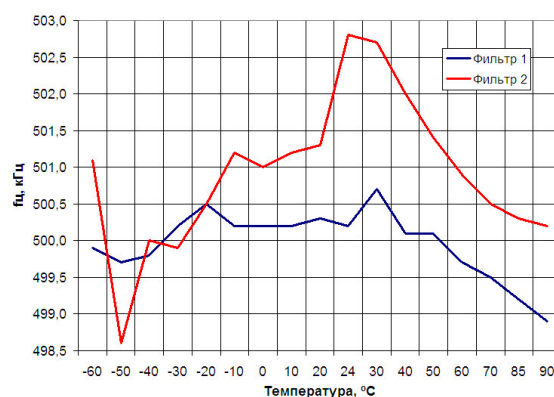


Рис. 2. Зависимость рабочей частоты фильтров 1, 2 в диапазоне температур

ЛИТЕРАТУРА

1. Глозман И.А. Пьезокерамика. Изд-во «Энергия», 1967.
2. Смажевская Е.Г., Фельдман Н.Б. Пьезоэлектрическая керамика. М., Изд-во «Советское радио», 1971, 200 с.

Повышение эффективности органической гетероструктуры «фотополупроводник- сегнетоэлектрик»

Блинов Л.М., Лазарев В.В., Юдин С.Г., Палто С.П.

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, 119333, Россия (E-mail: lbf@ns.crys.ras.ru)

В ряде публикаций [1-3] продемонстрированы попытки повышения эффективности фотовольтаических преобразователей с помощью сегнетоэлектрических слоев, поляризуемых импульсами внешнего напряжения. Так, в работах [1, 2] с помощью тонкого слоя (~2 нм) сегнетоэлектрика удалось повысить эффективность тонкопленочного преобразователя солнечной энергии в электрическую примерно в два раза. Однако в этих работах встроенные (built-in) электрические поля, играющие ключевую роль в повышении эффективности фотовольтаических преобразователей, не измерялись, и повышение эффективности не связывалось с усилением встроенного поля. Вообще, управление внутренними полями в органических фотоструктурах с помощью поляризованных сегнетоэлектрических слоев является очень актуальной задачей, так как открывает новые возможности для повышения их эффективности.

В данной работе изучается величина и спектральная зависимость фоточувствительности в наноразмерных гетероструктурах толщиной ~100 нм, состоящих из слоев органического фотополупроводника и сегнетоэлектрического сополимера P(VDF/TrFE), находящихся между двумя электродами. В качестве фотополупроводников использованы фталоцианин меди CuPc и донорно-акцепторная смесь ZnPc:C₆₀.

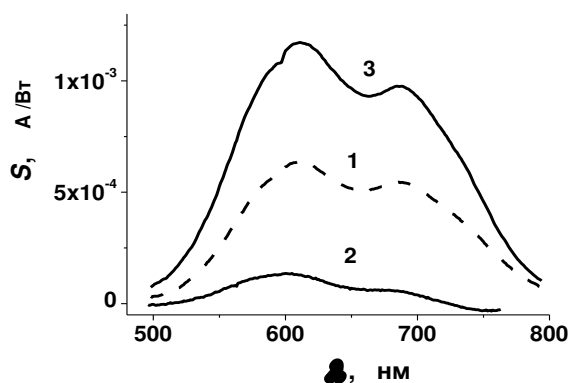


Рис. 1. Спектральные кривые фотовольтаического эффекта до поляризации (кривая 1) и после поляризации гетероструктуры «ITO-CuPc - P(VDF/TrFE)-Al» импульсами $U_p = +33$ В (кривая 2) и $U_p = -33$ В (кривая 3)

Гетероструктуры поляризуются импульсами внешнего напряжения, прикладываемого к электродам образцов. Для обеих гетероструктур получено примерно десятикратное возрастание фоточувствительности в результате поляризации сегнетоэлектрика импульсами внешнего напряжения от +30 В до -30 В. Показано, что возрастание фототока гетероструктур связано со стимулированной поляризацией слоя сегнето-электрика и, как следствие, определяется увеличением напряженности встроенного постоянного поля в гетероструктуре.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 14-12-00553.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yuan Y., Reece T. J., Sharma P. et. al., Nature Mater. **10**, 296 (2011).
2. Yuan Y., Sharma P., Xiao Zh. et al., Energy & Environ. Sci. **5**, 8558 (2012).
3. Hu L., Dalglish S., Magsushita M.M. et.al., Nature Commun. **5**, 3279 (2014).

Модуляция поляризации в сегнетоэлектрических пленках (BaSr)TiO₃ терагерцовым полем

**Билык В.Р.¹, Гришунин К.А.¹, Шерстюк Н.Э.¹, Овчинников А.В.²,
Чефонов О.В.², Кимель А.В.^{1,3}**

¹Московский технологический университет (МИРЭА), 119454, Москва, Россия
(E-mail: white_gfb@mail.ru)

²Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва, Россия

³Radboud University, Institute for Molecules and Materials, 6525ED, Nijmegen,
The Netherlands

Поведение диэлектриков под действием электрических импульсов длительностью порядка периода колебаний, что при частоте 1 ТГц составляет 1 пс, вызывает в последние годы большой интерес [1]. В отличие от полупроводников, где основной вклад дает электронная подсистема, в диэлектриках терагерцовое поле может вызывать смещение ионов и возбуждение фононных мод. Для сегнетоэлектриков смещение ионов и возбуждение полярного фонона означает динамическое переключение диэлектрической поляризации. Наряду с методом рентгеновской дифракции метод генерации второй оптической гармоники (ГВГ) является эффективным методом исследования динамики переключения поляризации электрическим полем [2]. В данной работе методом ГВГ исследовался отклик на воздействие сверхкоротких THz импульсов гетероэпитаксиальной пленки Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO₃ (BST) толщиной 500 нм были изготовлены методом ВЧ-распыления керамических мишеней на подложке MgO (001).

Исследования проводились в геометрии THz возбуждение (однопериодный импульс с пиковой амплитудой 300 кВт/см и длительностью ~1 пс) – оптическое зондирование (излучение Cr:Forsterite лазера с центральной длиной волны 1240 нм, длительностью импульса 100 фс и энергией 20 мДж). В наших исследованиях наблюдалась значительная модуляция сигнала ГВГ в пленке BST при воздействии на нее мощного THz импульса (Рис. 1). Для сравнения были измерены также аналогичные зависимости для centrosymmetric кристаллов SrTiO₃ и Si.

Полученные результаты объясняются генерацией второй оптической гармоники, индуцированной электрическим полем THz излучения. Показано, что модуляция нелинейно-оптического отклика может быть вызвана изменением сегнетоэлектрического параметра порядка. В частности, было показано, что воздействие THz импульса приводит к возникновению в пленке планарной компоненты поляризации, величина которой может достигать 6% от результирующей поляризации.

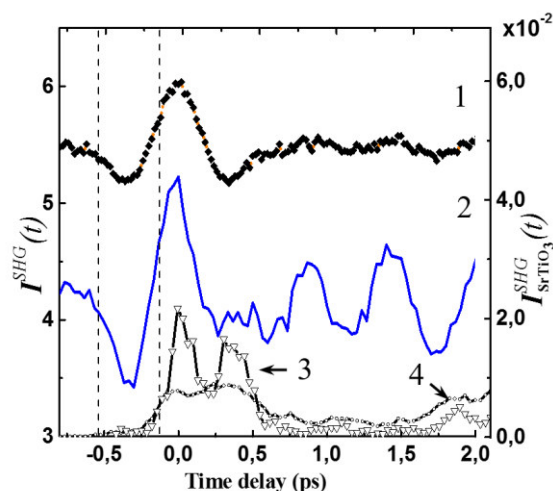


Рис. 1. Зависимость интенсивности ГВГ от времени задержки между ТГц импульсом накачки и оптическим зондирующим импульсом для пленки BST (2), Si (3) и SrTiO₃ (4, правая шкала); кривая (1) – форма THz импульса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kampfrath T., Tanaka K. & Nelson K. *Nature Photonics* **7**, 680 (2013).
2. Mishina E.D., Sherstyuk N.E., Golovko Y.I., et al. *Integr.Ferroelectrics* **92**, 65 (2007).

СОДЕРЖАНИЕ

Справедливость теоремы Имри и Ма в системах с дефектами типа «случайное локальное поле»	
<u>Сигов А.С.</u> , Берзин А.А., Морозов А.И.	9
Диэлектрические свойства двуслойных структур (Ba,Sr)TiO₃ на подложках из монокристаллического кремния	
Бирюков С.В., Головки Ю.И., <u>Мухортов В.М.</u>	10
Катионное упорядочение в перовскитах: что? где? когда?	
<u>Сахненко В.П.</u> , Тер-Оганесян Н.В.	11
Структурные фазовые переходы в кристаллах фторидов со структурой альпасолита, содержащих ионы редкоземельных элементов – исследование методом комбинационного рассеяния света	
<u>Втюрин А.Н.</u> , Крылов А.С., Крылова С.Н., Орешонков А.С., Воронов В.Н.	12
Барокалорический эффект при последовательных фазовых переходах вблизи тройной точки	
<u>Флёров И.Н.</u> , Горев М.В., Богданов Е.В.	13
Диэлектрическая нелинейность и скорость ультразвука в области структурного фазового перехода в керамике (K_{0.5}Na_{0.5})(Nb_{1-x}Ta_x)O₃	
<u>Бурханов А.И.</u> , Vormanis K., Семибратов В.О., Сопит А.В., Sternberg A., Antonova M., Kalvane A.	14
Межмодовое взаимодействие в антисегнетоэлектриках и родственных материалах	
<u>Вахрушев С.Б.</u>	15
Предпереходная динамика решетки в монокристалле цирконата-титаната свинца с малой концентрацией титана	
<u>Андроникова Д. А.</u> , Бронвальд Ю. А., Леонтьев Н. Г., Леонтьев И. Н., Бурковский Р. Г., Филимонов А.В., Вахрушев С. Б.	16
Динамика решетки и упругие свойства нанотрубок дифенилаланина	
<u>Зеленовский П.С.</u> , Южаков В.В., Давыдов А.О., Васильев С.Г., Холкин А.Л., Шур В. Я.	17
Особенности динамики решетки в двухслойных гетероструктурах на основе титаната бария-стронция	
<u>Лянгузов Н.В.</u> , Анохин А.С., Разумная А.Г., Головки Ю.И., Мухортов В.М.	18
Критическое рассеяние и несоизмеримые фазовые переходы в антисегнетоэлектриках PbZrO₃ и PbHfO₃ под давлением	
<u>Бурковский Р.Г.</u> , Бронвальд Ю.А., Андроникова Д.А., Князева М.А., Таганцев А.К., Филимонов А.В., Вахрушев С.Б.	19
Эффект взаимодействия мод в спектрах неупругого рассеяния света в Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO₃	
Дерец Н.К., Федосеев А.И., Сырников П.П., Seiji Kojima, <u>Лушников С.Г.</u>	20
Влияние ориентации подложки MgO на динамику решетки пленок титаната бария-стронция	
<u>Анохин А.С.</u> , Разумная А.Г., Головки Ю.И., Мухортов В.М.	21

Фазовая диаграмма кристаллов $(\text{NH}_4)_2\text{W}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_2\text{F}_4$ — исследование методом рассеяния нейтронов	
<u>Богданов Е.В.</u> , Смирнов Л.С., Натканец И., Флёров И.Н., Лапташ Н.М.....	22
Фотостимулированные явления в релаксорах	
<u>Мамин Р. Ф.</u>	23
TlInS_2 легированный V, Cr, Mn — новый сегнетоэлектрик релаксор	
Сардарлы Р.М., Абдуллаев А.П., <u>Салманов Ф.Т.</u> , Алиева Н.А., Оруджева А.А., Мамедова Г.Э.	24
О теплоемкости релаксоров со структурой перовскита	
<u>Шнайдштейн И.В.</u> , Грабовский С.В.	25
Кинетика зарождения термодинамически упорядоченных сегнетоэлектрических фаз в ряде монокристаллических твердых растворов	
<u>Камзина Л.С.</u> , Кулакова Л.А.	26
Особенности стеклодипольного состояния сегнетокерамики на основе ЦТС под воздействием температуры и электрического поля	
<u>Константинов Г.М.</u> , Константинова Я.Б., Швецова Н.А., Рыбьянец А.Н.	27
Дизайн и пьезоэлектрические свойства многокомпонентных твердых растворов с участием сегнетоэлектриков-релаксоров	
<u>Таланов М.В.</u> , Шилкина Л.А., Резниченко Л.А.....	28
Особенности поведения теплового расширения твердых растворов $(1-x)\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$	
<u>Горев М.В.</u> , Флёров И.Н., Vormanis K., Kalvane A.....	29
Эффекты различных режимов прикладываемого электрического поля на ориентационный электроакустический эффект в монокристаллах PMN	
<u>Федосеев А.И.</u> , Лушников С.Г., Коджима С.	30
Пористые диэлектрические пленки: технология, свойства, применения в электронике	
<u>Воротилов К.А.</u> , Сигов А.С.	31
Фазовые переходы в тонких пленках антисегнетоэлектрика PbZrO_3	
<u>Литягин Г.А.</u> , Бурковский Р.Г., Князева М.А., Андроникова Д.А., Бронвальд Ю.А., Вахрушев С.Б.....	32
Тонкие пленки органического сегнетоэлектрика 2-метилбензимидазола $\text{C}_8\text{N}_2\text{H}_8$	
<u>Балашова Е.В.</u> , Кричевцов Б.Б., Свиначев Ф.Б., Зайцева Н.В.	33
Сегнетоэлектричество в нанопластинках из SnS	
<u>Лебедев А.И.</u>	34
Электрооптика наноструктуры «органический сегнетоэлектрик - субволновая алюминиевая решетка»	
Блинов Л.М., <u>Лазарев В.В.</u> , Юдин С.Г., Палто С.П., Артемов В.В, Горкунов М.В.	35
Потенциальное сегнетоэлектричество нанолокализованных молекул воды	
<u>Gorshunov B.P.</u> , Torgashev V.I., Zhukova E.S., Thomas V.G., Shakurov G.S., Belyanchikov M.A., Savinov M., Kadlec Ch., Kadlec F., Petzelt J., Ostapchuk T., Forsenko D. A., Gorelik V. S., Dressel M.	36

Диэлектрические и магнитные свойства наноструктурированного титаната бария Аль Мандалави В.М., Короткова Т.Н., Каширин М.А., Калгин А.В., Емельянов Н.А., <u>Коротков Л.Н.</u>	37
Диэлектрические свойства нанокристаллической керамики BiFeO_3 <u>Садыков С.А.</u> , Д.К. Палчаев, Ж.Х. Мурлиева, Н. М.-Р. Алиханов, С.Н. Каллаев, С.М. Алиева	38
Пироэлектрический эффект в слоистых сегнетоэлектрических гетероструктурах <u>Солнышкин А.В.</u> , Кислова И.Л.	39
Наноструктуры «оксид графена - полимерные пленки» <u>Быстров В.С.</u> , Силибин М.В., Бдикин И.К.	40
Магнитные стекла и сегнетоэлектрические наноконкомпозиты на их основе <u>Набережнов А.</u> , Сысоева А., Королева Е., Ванина П., Tovar M., Голосовский И., Андреева Н., Nacke B., Nikanorov A., Nizhankovskii V.	41
Влияние внешнего и внутреннего давлений и электрического поля на свойства композитов нанопористое стекло – NH_4HSO_4 <u>Михалева Е.А.</u> , Флёргов И.Н., Карташев А.В., Горев М.В., Богданов Е.В., Бондарев В.С., Коротков Л.Н., Rysiakiewicz-Pasek E.	42
Фазовые переходы и диэлектрические свойства наноконкомпозита CoO-NaNO_2 –пористое стекло Бурдин Д.Ю., <u>Королева Е.Ю.</u> , Кумзеров Ю.А., Сысоева А.А., Филимонов А.В., Вахрушев С.Б.	43
Диэлектрические свойства нанопористых пленок Al_2O_3, заполненных сегнетоэлектриком $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ <u>Милинский А.Ю.</u> , Барышников С.В., Антонов А.А.	44
Экстремальные электромеханические характеристики и микроструктурные особенности сегнетопьезокерамик на основе титаната свинца <u>Рыбьянец А.Н.</u> , Луговая М.А., Константинов Г.М., Швецова Н.А., Макарьев Д.И.	45
Новые методы и конструкции фокусирующих пьезопреобразователей для ультразвуковой диагностики и терапии <u>Швецова Н.А.</u> , Макарьев Д.И., Швецов И.А., Щербинин С.А., Рыбьянец А.Н.	46
Перспективный высокотемпературный сенсор вибрации, колебаний и пульсаций на основе монокристаллического ниобата лития <u>Кубасов И.В.</u> , Быков А.С., Малинкович М.Д., Кислюк А.М., Пархоменко Ю.Н., Темиров А.А., Киселев Д.А.	47
Моделирование динамических режимов работы многослойного пьезокерамического актюатора <u>Храмцов А.М.</u> , Нерсесов С.С., Сегалла А.Г., Спицин А.И., Азин А.В., Рикконен С.В.	48
Микроструктура и электрофизические свойства высокотемпературной пьезокерамики $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$ <u>Спицин А.И.</u> , Буш А.А., Каменцев К.Е., Нерсесов С.С., Сегалла А.Г., Чистякова Н.А., Храмцов А.М.	49
Сегнетоэлектрики в терагерцовом поле <u>Мишина Е.Д.</u> , Гришунин К., Билык В., Сигов А.С., Кимель А.В., Агранат М.Б.	50

Изочастотная опалесценция в сегнетоэлектриках Горелик В.С., Свербиль П.П., Водчиц А.И., Войнов Ю.П.	51
Оптические гармоники вблизи поверхности сегнетоэлектрических фотонных кристаллов Ведерников А.А., Горелик В.С.	52
Исследование неупругого рассеяния света и нелинейно-оптического отклика на локальных полярных неоднородностях в кристаллах ниобата бария стронция различного стехиометрического состава Пугачев А.М., Зайцева И.В., Малиновский В.К., Суровцев Н.В., Ивлева Л.И., Лыков П.А. ...	53
Исследование фазовых переходов в кристаллах мультиферроиков со структурой хантита методом КР Крылов А.С., Мошкина Е.М., Софронова С.Н., Гудим И.А., Темеров В.Л., Крылова С.Н., Втюрин А.Н.	54
Понижение симметрии «кубических» центров Mn^{4+} и Fe^{3+} в тонких пластинках $SrTiO_3$: эффект локальный или макроскопический? Юсупов Р.В., Габбасов Б.Ф., Зверев Д.Г., Киямов А.Г., Никитин С.И., Трепаков В.А., Jastrabik L., Dejneka A.	55
Комбинационное рассеяние света при магнитном фазовом переходе в пленках феррита висмута легированного неодимом Кхабири Г., Разумная А.Г., Горьковая Е.Д., Анохин А.С., Мухортов В.М.	56
Оптические свойства и структурная однородность монокристаллов $LiNbO_3:V$ Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Яничев А.А., Титов Р.А., Теплякова Н.А., Макарова О.В. ...	57
Прямые доказательства скрытой структурной нестабильности кубических фтороперовскитов ABF_3 Писарев Р.В., Дубровин Р.М., Кижаев С.А., Сырников П.П.	58
Магнитоэлектрический эффект в шпинелях Тер-Оганесян Н.В., Saha R., Ghara S., Jang D.H., Kim K.H., Sundaresan A.	59
Исследование магнитоэлектрических и магнитоупругих свойств монокристаллов оксиборатов Дубровский А.А., Фрейдман А.Л., Балаев А.Д., Еремин Е.В., Гудим И.А., Темеров В.Л.	60
Электрическая поляризация, индуцированная фазовым расслоением в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях RMn_2O_5 ($R = Gd$ и Bi) Ханнанов Б.Х., Санина В.А., Головенчиц Е.И., Щеглов М.П.	61
Кристаллическая структура и диэлектрические отклики твердых растворов системы $(0.95-x)BiFeO_3-0.05PbTiO_3-xPbFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$ Глазунова Е.В., Болдырев Н.А., Шилкина Л.А., Резниченко Л.А.	62
Структура и диэлектрический отклик потенциальных сегнетоэлектриков со структурой гексаферрита М-типа Михейкин А.С., Торгашев В.И., Горшунов Б.П., Буш А.А., Разумная А.Г.	63
Нестехиометрия твердых растворов $La_{1-x}Ca_xMnO_3$ Рудская А.Г., Куприянов М.Ф.	64

Теплофизические свойства мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{FeO}_3$ ($x=0-0.20$)	
<u>Каллаев С.Н.</u> , Бакмаев А.Г., Омаров З.М., Митаров Р.Г., Садыков С.А., Хасбулатов С.В.	65
Магнитокалорический эффект в мультиферроиках BiFeO_3 замещенных Zn	
Chaudhary Y.A., Bendre S.T., Макоед И.И., <u>Амиров А.А.</u> , Юсупов Д.М., Родионова В.В., Чичай К.А.	66
Формирование дендритных микро- и нано-доменных структур в одноосных сегнетоэлектриках	
<u>Шур В.Я.</u> , Ахматханов А.Р.	67
Исследование кинетики доменной структуры в монокристаллах титанил-фосфата калия для создания регулярных доменных структур	
<u>Ахматханов А.Р.</u> , Пелегова Е.В., Васькина Е.М., Чувакова М.А., Шур В. Я., Иванов М., Холкин А.Л.	68
Доменная структура монокристаллов β-глицина	
<u>Васильева Д.С.</u> , Васильев С.Г., Зеленовский П.С., Шур В.Я., Холкин А.Л.	69
Кинетика доменной структуры кристалла ТГС вблизи температуры фазового перехода	
<u>Голицына О.М.</u> , Дрождин С.Н., Чулакова В.О.	70
Влияние внешних воздействий на доменную структуру кристаллов титаната бария	
<u>Киселев Д.А.</u> , Ильина Т.С., Большакова Н.Н., Семенова Е.М., Кузнецова Ю.В., Сергеева О.Н., Малинкович М.Д.	71
Доменная инженерия в оптических волноводных структурах	
Волк Т.Р.	72
Особенности формирования доменов в кристаллах ниобата лития под действием электронного луча	
<u>Коханчик Л.С.</u> , Волк Т.Р.	73
Исследование процессов доменообразования в тонких монокристаллических пленках LiNbO_3 в поле зонда атомно-силового микроскопа	
<u>Гайнутдинов Р.В.</u> , Волк Т.Р., Лавров С.Д., Zhang H.H.	74
Эффекты обратного переключения в релаксорном сегнетоэлектрике SBN, исследованные методом PFM спектроскопии	
Симагина Л.В., <u>Боднарчук Я.В.</u> , Гайнутдинов Р.В., Волк Т.Р., Ивлева Л.И.	75
Процессы усталости в триглицинсульфате и влияние на них магнитного поля	
<u>Иванова Е.С.</u> , Петржик Е.А., Гайнутдинов Р.В., Лашкова А.К., Волк Т.Р.	76
Влияние деполяризующих полей на фазовые переходы в сегнетоэлектрических композитах	
Даринский Б.М., <u>Сидоркин А.С.</u> , Золотухина М.А., Нгуен Х.Т.	77
Диэлектрическая релаксация в сегнетоэлектриках с заряженными доменными стенками	
<u>Есин А.А.</u> , Аликин Д.О., Турыгин А.П., Абрамов А.С., Ахматханов А.Р., Шур В.Я.	78
Переключение переполаризации в заряженной доменной границе в тонкой сегнетоэлектрической пленке	
Лазарев А.П., Сигов А.С., <u>Даринский Б.М.</u>	79

Сегнетоэлектрические свойства керамик на основе титаната натрия-висмута <u>Политова Е.Д.</u> , Голубко Н.В., Калева Г.М., Мосунов А.В., Садовская Н.В., Стефанович С.Ю.	80
Обратный флексоэлектрический эффект в монокристаллах SrTiO₃ и KTaO₃ <u>Залесский В.Г.</u> , Обозова Е.Д.	81
Термооптические исследования явлений ближнего полярного порядка в сегнетоэлектрической фазе. Индуцированная примесью Ca²⁺ сегнетофаза в SrTiO₃ <u>Марковин П.А.</u> , Трепаков В.А., Гужва М.Е., Квятковский О.Е.	82
Внутреннее поле и «мертвый слой» в тонких пленках ЦТС <u>Пронин И.П.</u> , Осипов В.В., Каптелов Е.Ю., Сергеева О.Н., Богомоллов А.А.	83
Флексоэлектрическая поляризация, вызванная неоднородным нагревом пластинки <u>Юрков А.С.</u> , Хребтов М.Ю., Бобров М.С., Козюлин Н.Н., Юдин П.В.	84
Семейство сегнетоэлектриков-витлокитов <u>Стефанович С.Ю.</u> , Лазорьяк Б.И.	85
Влияние кристаллической структуры на электрические свойства тонкопленочных PZT структур <u>Делимова Л.А.</u> , Гущина Е.В., Зайцева Н.В., Павлов С.И., Серегин Д.С., Воротилов К.А., Сигов А.С.	86
Жидкофазная рекристаллизация и особенности формирования поликристаллического ландшафта в многокомпонентных сегнетоэлектрических средах на основе ниобатов щелочных металлов <u>Абубакаров А.Г.</u> , Нагаенко А.В., Сайдулаев Х.Б., Шилкина Л.А., Андриюшина И.Н. ¹ , Андриюшин К.П., Садыков Х.А., Вербенко И.А., Резниченко Л.А.	87
Кинетика роста, пьезоэлектрические и пироэлектрические свойства микротрубок дифенилаланина <u>Васильев С.Г.</u> , Нураева А.С., Васильева Д.С., Романюк К.Н., Чезганов Д.С., Есин А.А., Зеленовский П.С., Шур В.Я., Холкин А.Л.	88
Физические свойства новых биосегнетоэлектриков и пьезоэлектриков <u>Холкин А.Л.</u> , Сейедхоссейни Е., Зеленовский П.С., Васильев С.Г., Копыл С., Есин А.А., Нураева А.С., Васильева Д.С., Шур В.Я.	89
Широкодиапазонная ТГц-ИК спектроскопия активных диэлектриков <u>Командин Г.А.</u>	90
Механизм поляризации жидкой воды по данным диэлектрической спектроскопии <u>Волков А.А.</u> , Артёмов В.Г.	91
Особенности поведения структуры (NH₄)₃VO₂F₄ и (NH₄)₃VOF₅ при фазовых переходах <u>Герасимова Ю.В.</u> , Орешонков А.С., Крылов А.С., Лапташ Н.М.	95
Влияние концентрации примеси на скрытую теплоту сегнетоэлектрического фазового перехода в кристаллах BaTiO₃ <u>Магоматов Р.М.</u> , Ахматов Х.С.-А., Чалаев Т.С.	96
Классификация феноменологических моделей фазовых переходов методами теории катастроф <u>Павлов С.В.</u>	97

Исследования особенностей фазовых переходов в твёрдых растворах системы $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ ($0,02 \leq x \leq 0,3$)	
Захаров Ю.Н., Лутохин А. Г., Сарычев Д.А., <u>Спиваков А.А.</u>	98
Моделирование фазового перехода в KDP методом Монте-Карло	
<u>Абалмасов В.А.</u>	99
Температурные эволюции коэффициентов в разложении свободной энергии кристалла Rb_2ZnCl_4 по поляризации методом гармонического анализа	
<u>Горбатенко В.В.</u> , Прасолов Б.Н., Горбатенко С.А.	100
Квантовохимический анализ особенностей структурного фазового перехода в квазиодномерных сегнетоэлектриках $Pb(H/D)PO_4$	
<u>Долин С.П.</u> , Бреславская Н.Н., Михайлова Т.Ю.	101
Изучение электромеханического гистерезиса в полимерных сегнетоэлектрических материалах методами компьютерного моделирования	
<u>Егоров В.И.</u> , Герасимов Р.А., Петрова Т.О., Максимова О.Г., Максимов А.В.	102
Первопринципные исследования поляризационных, магнитных, оптических и электронных свойств двойных перовскитов $LaPbTSbO_6$ (T=Fe, Ni, Co)	
<u>Жандун В.С.</u> и Зиненко В.И.	103
Магнитные, магнетоэлектрические и электронные свойства шпинелей $MnGa_2O_4$ и $CoRh_2O_4$	
<u>Жандун В.С.</u> , Немцев А.В. и Зиненко В.И.	104
Формирование конденсата параметров порядка в манганитах $AMnO_3$ (A = La, Pr, ...) при фазовых переходах с образованием изосимметричных фаз	
<u>Ивлиев М.П.</u>	105
Применение кристаллографического сервера Бильбао для изучения структурных фазовых переходов в сегнетоэлектриках	
<u>Крылова С.Н.</u>	106
Обобщение формулы Максвелла-Гарнетта на случай сегнетоэлектриков	
Старков А.С., Пахомов О.В., Старков И.А., Дедык А.И., <u>Мыльников И.Л.</u>	107
Определение температурной зависимости параметров кристаллической решетки, спонтанной деформации и поляризации при фазовом переходе $m3mF4mm$	
Непочатенко В.А., Непочатенко И.А.	108
К вопросу математического моделирования поляризации поликристаллических сегнетоэлектриков	
Скалиух А.С., Ли Гуоронг.....	109
Сравнительный анализ электронной структуры и диэлектрической восприимчивости кристаллов α-TeO_2 и β-TeO_3	
<u>Смирнов М.Б.</u> , Рогинский Е.М.	110
Влияние поверхностной энергии на прямой флексоэлектрический эффект в пластине	
<u>Юрков А.С.</u>	111
Частоты валентных и деформационных ОН-колебаний в KDP согласно их зависимости от температуры	
<u>Абалмасов В.А.</u> , Суровцев Н.В.	112

Расчет динамики кристаллической решетки YGaO_3 <u>Андрюшин Н.Д.</u> , Павловский М.С., Зиненко В.И.	113
Исследование динамики решетки кристалла LaF_3 методами КР спектроскопии и функционала плотности (DFT) <u>Ершов А.А.</u> , Крылов А.С., Орешонков А.С., Воронов В.Н., Втюрин А.Н.	114
Эволюция фазовой диаграммы системы $(1-x)\text{NaNbO}_3-x\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ в зависимости от условий структурообразования <u>Зубарев Я.Ю.</u> , Шилкина Л.А., Дудкина С.А., Резниченко Л.А.	115
Анализ распределения ионов в кристаллической решетке ниобата стронция-кальция – бария Малышкина О.В., <u>Иванова А.И.</u> , Малышкин Ю.А., Фоломеева А., Dec J.	116
Исследование структуры промежуточных фаз гафната свинца <u>Князева М.А.</u> , Бурковский Р.Г., Андроникова Д.А., Бронвальд Ю.А., Вахрушев С.Б., Филимонов А.В.	117
Комбинационное рассеяние света на мягкой моде в кристаллах ниобата лития Горелик В.С., <u>Пятышев А.Ю.</u>	118
Процессы переключения поляризации в сегнетоэлектрическом кристалле TGS с родамином и релаксоре SBN-61, допированном кобальтом <u>Ратина Н.В.</u> , Бурханов А.И., Медников С.В., Ивлева Л.И.	119
Исследование кристаллической структуры и динамики смешанных кристаллов $\text{K}_2\text{x}(\text{NH}_4)\text{xSeO}_4$ методами рассеяния рентгеновских лучей и нейтронов <u>Смирнов Л.С.</u> , Натканец И., Лоозе А., Возниак К., Доминиак П.М., Цинк Н., Мелнык Г., Павлюкойч А., Местрес Л., Chudoba D.	120
Структурные изменения в пентоксиде ванадия при интеркаляции лития Температурная зависимость спектров КР и структура кристалла $\delta\text{-BiV}_3\text{O}_6$ <u>Стрикина Е.А.</u> , Орешонков А.С., Крылов А.С., Втюрин А.Н., Черепяхин А.В.	122
Диэлектрический гистерезис в синусоидально изменяющемся электрическом поле <u>Акбаева Г.М.</u> , Скрылёв А.В., Бородина В.В., Панич А.Е.	123
Суперионная проводимость в кристаллах TlInS_2 и TlGaSe_2 индуцированная γ-облучением Сардарлы Р.М., <u>Алиева Н.А.</u> , Салманов Ф.Т., Микаилова А.Д., Юсифов М.Ю., Оруджева А.А.	124
Влияние температуры спекания на структуру и свойства керамики ЦТС Топчиёв А.А., <u>Барабанова Е.В.</u> , Вихрова Д.А., Малышкина О.В.	125
Диэлектрические исследования сегнетоэлектрического композита $\text{AgNa}(\text{NO}_2)_2/\text{BaTiO}_3$ <u>Барышников С.В.</u> , Милинский А.Ю., Стукова Е.В.	126
Особенности фазообразования перовскитовых материалов с элементами Pb и Ca в A-подрешетке <u>Гринь П.Г.</u> , Шилкина Л.А., Дудкина С.И., Разумовская О.Н.	127
Сегнетоэлектрические и суперионные свойства Pb-содержащих молибдатов Ln_2MoO_6 (Ln = La, Nd) <u>Воронкова В.И.</u> , Харитоновна Е.П., Орлова Е.И., Казаков С.М.	128

Диэлектрические характеристики твердых растворов $Tl(GaS_2)_{1-x}(InSe_2)_x$ <u>Гуртовой В.Г.</u> , Шелег А.У., Мустафаева С.Н., Керимова Э.М., Джафарова С.Г.....	129
Негидростатические механические напряжения в прессованном порошке титаната бария и их влияние на сегнетоэлектрический фазовый переход <u>Зайцева И.В.</u> , Пугачев А.М., Суровцев Н.В., Крылов А.С.....	130
Магнитоэлектрические слоистые композиты на основе $Tb_{0,12}Dy_{0,2}Fe_{0,68}$, $Mn_{0,4}Zn_{0,6}Fe_2O_4$ и $PbZr_{0,53}Ti_{0,47}O_3$ с внутренним смещающим магнитным полем <u>Калгин А.В.</u> , Гриднев С.А., Порядский А.А., Суворков Д.Р.	131
Флуктуации тока в поликристаллической сегнетокерамике <u>Картунова Е.М.</u> , Габриэлян А.В., Жога Л.В.	132
Структура, пьезо- и диэлектрические свойства твёрдых растворов $NaNbO_3-KNbO_3-CuNb_2O_6$ <u>Кисель О.Ю.</u> , Таланов М.В., Шилкина Л.А., Резниченко Л.А.....	133
Роль структурных дефектов в формировании физических свойств сегнетокерамик твердых растворов на основе цирконата-титаната свинца <u>Константинов Г.М.</u> , Макарьев Д.И., Швецова Н.А., Петрова Е.И., Рыбьянец А.Н.	134
Нелинейная диэлектрическая проницаемость и детерминированный хаос в сегнетоэлектриках системы $K_{1-x}(NH_4)_xH_2PO_4$ <u>Короткова Т.Н.</u> , Коротков Л.Н.....	135
Электромеханические свойства монокристаллов $K_{1-x}(NH_4)_xH_2PO_4$ вблизи антисегнетоэлектрического фазового перехода <u>Коротков Л.Н.</u> , Короткова Т.Н., Лиховая Д.В., Стекленева Л.С., Левицкий Р.Р.....	136
Поляризационный и пьезоэлектрический отклик в органическом сегнетоэлектрике 2-метилбензимидазоле <u>Кричевцов Б.Б.</u> , Балашова Е.В., Свинарев Ф.Б., Зайцева Н.В., Панкова Г.А., Попов С.Н.	137
Микроструктурные особенности и электрофизические характеристики керамоматричных композитов «керамика-кристалл» <u>Луговая М.А.</u> , Петрова Е.И., Науменко А.А., Константинов Г.М., Рыбьянец А.Н.	138
Послеростовая термическая обработка и классификация микро- и макродефектной структуры сильно легированных кристаллов $LiNbO_3:Zn$ и $LiNbO_3:Mg$ <u>Макарова О.В.</u> , Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Бирюкова И.В.....	139
Диэлектрические свойства сегнетоэлектрических нанокомпозитов на основе KD_2PO_4 <u>Мишинский А.Ю.</u> , Барышников С.В., Чарная Е.В., Самойлович М.И.	140
Температурный гистерезис ёмкости конденсаторных структур на основе керамики $BSTO$ различного состава Семёнов А.А., Дедык А.И., Пахомов О.В., Павлова Ю.В., <u>Мыльников И.Л.</u> , Буй М.Т.....	141
О метастабильной фазе в монокристаллах $BaTiO_3$ <u>Новик В.К.</u> , Малышкина И.А., Гаврилова Н.Д.	142
Диэлектрические свойства и проводимость протонпроводящих монокристаллов $(K_{1-x}(NH_4)_x)_3H(SO_4)_2$ Малышкина И.А., <u>Новик В.К.</u> , Селезнева Е.В., Макарова И.П.....	143

Пьезоэлектрические и механические свойства микротрубок дифенилаланина, измеренные на полярном срезе <u>Нураева А.С.</u> , Васильев С.Г., Южаков В.В., Зеленовский П.С., Копыл С., Холкин А.Л., Шур В.Я.	144
Пороговые эффекты в формировании практически важных свойств и эволюции структуры кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ <u>Палатников М.Н.</u> , Сидоров Н.В., Макарова О.В., Сандлер В.А.	145
Влияние механической активации на получение и свойства материалов на основе системы $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3-x(\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x)\text{TiO}_3$ <u>Половинкин Б.С.</u> , Таланов М.В., Шилкина Л.А., Вербенко И.А.	146
Термополяризационные явления в области температур стеклования (размягчения) аморфного полидиэтилсилоксана Попов И.В.	147
Аномалии электрофизических параметров прозрачной сегнетопьезокерамики ЦТСЛ в окрестности размытого фазового перехода <u>Резниченко А.Н.</u> , Петрова Е.И., Науменко А.А., Швецова Н.А., Рыбьянец А.Н.	148
Комплексные электрофизические параметры бессвинцовых сегнетопьезокерамик на основе твердых растворов ниобата-натрия лития <u>Рыбьянец А.Н.</u> , Луговая М.А., Резниченко Л.А., Науменко А.А., Резниченко А.Н.	149
Исследование кластерообразования в кристаллах ниобата лития Воскресенский В.М., Стародуб О.Р., <u>Сидоров Н.В.</u> , Палатников М.Н.	150
Диэлектрические, пьезоэлектрические и механические свойства композита сополимера П(ВДФ-ТрФЭ) с углеродными нанотрубками <u>Силибин М.В.</u> , Киселев Д.А., Солнышкин А.В., Карпинский Д.В., Сыса А.В., Бдикин И.К.	151
Диэлектрические и упругие свойства в области размытого структурного фазового перехода в многокомпонентной системе на основе ЦТС <u>Скрылёв А.В.</u> , Бурханов А.И., Акбаева Г.М., Панич А.Е.	152
Ионная проводимость сегнетоэлектрических кристаллов KTiOPO_4 “as grown” и после высокотемпературного отжига в вакууме <u>Сорокин Н.И.</u> , Шалдин Ю.В., Новикова Н.Е.	153
Особенности диэлектрических спектров кристалла ТГС при нагреве и охлаждении Овчинникова Г.И., Иванова Е.С., Еремеев А.П., Белугина Н.В., <u>Толстихина А.Л.</u>	154
Полиморфизм и свойства кислородпроводящих соединений в тройных системах $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Nd}(\text{Pr})_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$ <u>Харитонов Е.П.</u> , Орлова Е.И., Воронкова В.И.	155
Кристаллическая структура и микроструктура керамоматричных композиционных материалов <u>Швецова Н.А.</u> , Константинов Г.М., Науменко А.А., Рыбьянец А.Н.	156
Исследование зависимости упругих и пьезоэлектрических свойств микротрубок дифенилаланина от содержания воды <u>Южаков В.В.</u> , Васильев С.Г., Зеленовский П.С., Холкин А.Л., Шур В.Я.	157

Влияние окислительных обработок на электрические свойства восстановленных кристаллов LiNbO_3	
<u>Яценко А.В.</u> , Ягунов С.В., Притуленко А.С.	158
Дисперсионное поведение диэлектрической проницаемости твердых растворов на основе системы ЦТС	
<u>Андрюшина И.Н.</u> , Андрюшин К.П., Дудкина С.И., Резниченко Л.А.	159
Взаимодействие поляризации и параметра порядка в релаксоре $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$	
<u>Борисов С.А.</u> , Вахрушев С.Б., Долгаков И.А.	160
Зависимость диэлектрического отклика монокристаллов $\text{PbSc}_{1/2}\text{Ta}_{1/2}\text{O}_3$ от условий роста и степени упорядочения	
Полушина А.Д., Смирнова Т.А., <u>Залесский В.Г.</u> , Шаплыгина Т.А., Зайцева Н.Н., Лушников С.Г.	161
Диэлектрический отклик гетерофазного твердого раствора $(\text{Ca-Pb})\text{TiO}_3$	
<u>Командин Г.А.</u> , Породинков О.Е., Спектор И.Е., Буш А.А., Каменцев К.Е., Серегин Д.С., Исхакова Л.Д.	162
Фотостимулированные токи в монокристаллах магнониобата и магнониобата-титаната свинца	
<u>Мигачев С.А.</u> , Мамин Р. Ф., Раевский И.П., Раевская С.И.	163
Влияние структурных дефектов на диэлектрические свойства кристаллов $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ и $0.87\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3 - 0.13\text{BaTiO}_3$	
Крузина Т.В., <u>Сидак В.М.</u> , Трубицын М.П., Попов С.А., Тулук А.Ю., Суханич Я.	164
Широкополосный диэлектрический отклик твердого раствора $\text{SrTiO}_3\text{-SrMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$	
<u>Спектор И.Е.</u> , Командин Г.А., Породинков О.Е., Гончаров Ю.Г.	165
Феноменологическая теория одноосного релаксора	
<u>Широков В.Б.</u> , Павленко А.В., <u>Юзюк Ю.И.</u>	166
Фазовая диаграмма состояний четырехкомпонентной системы $0.98(x\text{PbTiO}_3\text{-}y\text{PbZrO}_3\text{-}z\text{PbNb}_{2/3}\text{Mg}_{1/3}\text{O}_3) - 0.02\text{PbGeO}_3$ и особенности дисперсионных характеристик ее твердых растворов	
<u>Юрасов Ю.И.</u> , Шилкина Л.А., Резниченко Л.А.	167
Изучение магнитных свойств сегнетокерамики $\text{PbMn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$	
<u>Абдулвахидов Б.К.</u> , Садыков С.А., Амиров А.А., Каллаев С.Н., Омаров З.М., Абдулвахидов К.Г., Сирота М.А., Дмитренко И.П., Русалев Ю.В.	168
Влияние модифицирования на диэлектрические макроотклики твердых растворов системы $(1-x)\text{BiFeO}_3\text{-}x\text{BaTiO}_3$	
<u>Болдырев Н.А.</u> , Глазунова Е.В., Резниченко Л.А.	169
Теплопроводность и теплоемкость мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{FeO}_3$	
<u>Гаджиев Г.Г.</u> , Омаров З.М., Бакмаев А.Г., Каллаев С.Н., Амирова А.А., Абдуллаев Х.Х., Резниченко Л.А., Хасбулатов С.В.	170
Температурная зависимость диэлектрической проницаемости фтороперовскитов марганца AMnF_3 ($A = \text{K, Rb, Cs}$)	
<u>Дубровин Р.М.</u> , Кижаяев С.А., Сырников П.П., Писарев Р.В.	171

Магнитодиэлектрика гетерогенных материалов на основе манганитов <u>Кабиоров Ю.В.</u> , Гавриляченко В.Г., Богатин А.С., Медведев Б.С., Гаврилова Т.П., Еремина Р.М., Лядов Н.М.	172
Толеранс-фактор для гексагональных структур $R\text{MnO}_3$ <u>Рудская А.Г.</u> , Чаговец С.В., Куприянов М.Ф.	173
Эволюция структуры в керамиках $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{MnO}_3$ <u>Титов С.В.</u> , Павленко А.В., Кравчук К.С., Шилкина Л.А.	174
Температурное поведение ротационных параметров порядка в твердом растворе $\text{La}_{0.25}\text{Ca}_{0.75}\text{MnO}_3$ <u>Троценко В.Г.</u> , Михейкин А.С., Широков В.Б., Разумная А.Г., Кадыров Л.С., Горшунов Б.П., Торгашев В.И.	175
Ферроэлектрические свойства $\text{Bi}_2(\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x)_2\text{O}_7$ <u>Удод Л.В.</u> , Аплеснин С.С., Ситников М.Н.	176
Структурные, магнитные и магнитодиэлектрические свойства халькогенидов TlInS_2 и TlGaSe_2 с имплантированной примесью кобальта <u>Хайбуллин Р.И.</u> , Валеев В.Ф., Лядов Н.М., Нуждин В.И., Максуютолы М., Микаилзаде Ф.А., Алиева В.Б., Маммадов Т.Г.	177
Фазовый состав, диэлектрические спектры и температуропроводность твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Ho}_x\text{FeO}_3$ <u>Хасбулатов С.В.</u> , Павелко А.А., Шилкина Л.А., Бакмаев А.Г., Резниченко Л.А.	178
Локальное переключение поляризации в керамике феррита висмута <u>Абрамов А.С.</u> , Аликин Д.О., Турыгин А.П., Walker J.B., Rojac T., Шур В.Я., Холкин А.Л. ..	180
Особенности токов переключения в монокристаллах титанил-фосфата калия Ахматханов А.Р., <u>Васькина Е.М.</u> , Чувакова М.А., Пелегова Е.В., Шур В.Я., Холкин А.Л.	181
Формирование доменной структуры в кристаллах ниобата лития, легированного MgO, при облучении сфокусированным ионным пучком <u>Власов Е.О.</u> , Чезганов Д.С., Гимадеева Л.В., Ахматханов А.Р., Чувакова М.А., Аликин Д.О., Шур В.Я.	182
Формирование электронным пучком регулярной доменной структуры в волноводах, созданных методом мягкого протонного обмена в ниобате лития <u>Гимадеева Л.В.</u> , Чезганов Д.С., Власов Е.О., Нерадовский М.М., Колчина Е.А., Чувакова М.А., Tronche H., Doutre F., Baldi P., De Micheli M.P., Шур В.Я.	183
Корреляционные эффекты при формировании доменной структуры кристалла триглицинсульфата вблизи температуры фазового перехода <u>Голицына О.М.</u> , Дрождин С.Н., Чулакова В.О.	184
Процессы поляризации и акустические свойства бессвинцовой керамики на основе KNN модифицированной барием Бурханов А.И., <u>Жирков А.В.</u> , Борманис К., Антонова М., Калване А.	185
О возможности детектирования доменов в кристалле LiNbO_3 при помощи рамановской спектроскопии <u>Черных С.Г.</u> , Коханчик Л.С., <u>Иржак А.В.</u> , Иржак Д.В.	186

Переключение переполяризации в заряженной доменной границе в тонкой сегнетоэлектрической пленке	
Лазарев А.П., Сигов А.С., Даринский Б.М.	187
Формирование доменной структуры в LiNbO_3 с неоднородной объемной проводимостью	
Пряхина В.И., Аликин Д.О., Негашев С.А., Шур В.Я.	188
Исследование эффекта самоорганизованного роста доменов в неполярных срезах ниобата лития	
Турьгин А.П., Аликин Д.О., Аликин Ю.М., Шур В.Я.	189
Переключение поляризации и кинетика доменов в монокристаллах PMN-0,3PT	
Шур В.Я., Ахматханов А.Р., Грешняков Е.Д., Ушаков А.Д., Васькина Е.М., Аликин Д.О., Wei X., Xu Z., Li Z., Wang S., Zhuang Y., Hu Q.	190
Регулярная доменная структура в ниобате лития, созданная облучением электронным пучком	
Чезганов Д.С., Власов Е.О., Ахматханов А.Р., Кузнецов Д.К., Чувакова М.А., Шур В.Я.	191
Формирование дендритных доменных структур в ниобате лития	
Чувакова М.А., Есин А.А., Ахматханов А.Р., Чезганов Д. С., Зеленовский П. С., Шур В. Я.	192
Анализ спонтанной эволюции доменной структуры вблизи T_C с использованием пространственно-временных корреляционных функций	
Голицына О.М., Дрождин С.Н., Чулакова В.О.	193
Исследование контактных явлений на границе раздела PZT-Pt методом наведенного тока	
Антонович А.Н., Лапин Д.Г., Петрушин А.А., Подгорный Ю.В.	194
Формирование и свойства пленочных нанокомпозитов сегнетоэлектрик-полимер	
Афанасьев В.П., Еланская К.Г., Мухин Н.В., Соколова И.М., Чигирев Д.А.	195
Эпитаксиальные пленки $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ и BiFeO_3 на монокристаллических подложках (111) MgO	
Бунина О.А., Головки Ю.И., Мухортов В.М.	196
Полярные свойства наночастиц гидроксиапатита	
Быстрова А.В., Дехтяр Ю.Д.	197
Особенности сегнетоэлектрического состояния в двуслойных гетероструктурах на основе титаната бария-стронция	
Головки Ю.И., Мухортов В.М., Бирюков С.В.	198
Релаксационные процессы в пленках ЦТС в постоянных электрических полях	
Иванов В.В., Голубева Е.Н., Сергеева О.Н., Пронин И.П.	199
Влияние размерных эффектов на термодинамические свойства микро- и нанокерамики сегнетоэлектрика BaTiO_3	
Бондарев В.С., Горев М.В., Карташев А.В., Погорельцев Е.И., Михалева Е.А., Флёров И.Н.	200
Размерный эффект в нанокомпозите на основе нитрита натрия внедренного в матрицу SBA-15 (3D)	
Ефимова О.В., Стукова Е.В., Зотова О.В.	201

Вклад спонтанной поляризации в барьерные эффекты гетероструктур на основе тонких пленок PZT	
<u>Каменщиков М.В.</u> , Солнышкин А.В., Пронин И.П.....	202
Электрофизические и пьезоэлектрические характеристики пленок $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$	
<u>Киселев Д.А.</u> , Афанасьев М.С., Левашов С.А., Сивов А.А., Чучева Г.В.	203
СВЧ фотонные кристаллы на основе гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/MgO$	
<u>Масычев С.И.</u> , Мухортов В.М.....	204
Сегнетоэлектрические пленки и гетероструктуры, полученные экстракционно-пиролитическим методом	
<u>Патрушева Т.Н.</u> , Семенова О.В., Слизкова А.В., Раилко М.Ю.	205
Исследование влияния объема на поверхность сегнетоэлектрических систем	
<u>Петрова Т.О.</u> , Максимова О.Г., Герасимов Р.А., Баруздина О.С., Максимов А.В.	206
Моделирование стационарного тока утечки структур с тонкими сегнетоэлектрическими пленками ЦТС	
<u>Подгорный Ю.В.</u> , Воротилов К.А., Сивов А.С.	207
Определение толщины нарушенного слоя в конденсаторных сегнетоэлектрических структурах	
<u>Подгорный Ю.В.</u> , Воротилов К.А., Сивов А.С.	208
Электродинамические параметры пленок PZT в ТГц-ИК области	
<u>Породинков О.Е.</u> , Командин Г.А., Спектор И.Е., Волков А.А., Серегин Д.С., Воротилов К.А., Сивов А.С.	209
Влияние механических напряжений и катионных замещений на зарядовое состояние межфазной границы $LaAlO_3/(001)SrTiO_3$	
Бойков Ю.А., Серенков И.Т., Сахаров В.И., Данилов В.А., <u>Пронин И.П.</u> , Тумаркин А.В., Калабухов А., Клаесон Е.	210
Влияние давления рабочего газа на состав и униполярность тонких пленок ЦТС, полученных методом ВЧ магнетронного осаждения	
<u>Сенкевич С.В.</u> , Пронин И.П., Каптелов Е.Ю., Долгинцев Д.М., Пронин В.П., Киселев Д.А.	211
Фотопроводимость гетероструктур на основе SiC/Si	
Закамский Р.А., Солнышкин А.В., <u>Сергеева О.Н.</u> , Кукушкин С.А., Феокистов Н.А., Пронин И.П., Сенкевич С.В. Некрасова Г.М.	212
Формирование структур PZT на кремнии	
<u>Серегин Д.С.</u> , Базирувиха А.-М., Воротилов К.А., Делимова Л.А., Зайцева Н.В., Руденко К.В., Лукичев В.Ф.	213
Исследование особенностей динамики решетки двухкомпонентных сегнетоэлектрических сверхрешеток	
<u>Тихонов Ю.А.</u> , Разумная А.Г., Захарченко И.Н., Юзюк Ю.И.	214
Сегнетоэлектрические пленки на алмазоподобных подложках для сверхвысокочастотных применений	
<u>Тумаркин А.В.</u> , Гагарин А.Г., Котельников И.В., Злыгостов М.В., Сапего Е.Н.	215

Варьирование состава сегнетоэлектрических пленок при ионно-плазменном распылении: эксперимент и моделирование	
<u>Тумаркин А.В.</u> , Вольпяс В.А., Одинец А.А., Злыгостов М.В., Сапего Е.Н.	216
Сегнетоэлектрические туннельные переходы на основе сверхтонких плёнок титаната бария на сапфире	
<u>Тумаркин А.В.</u> , Гагарин А.Г.	217
Локальные пьезоэлектрические свойства перфорированных сегнетоэлектрических пленок	
<u>Шерстюк Н.Э.</u> , Иванов М.С., Мишина Е.Д., Холкин А.Л.	218
Микроскопия планарного переключения поляризации в сегнетоэлектрических пленках (BaSr)TiO₃	
<u>Шестакова А.П.</u> , Билык В.Р., Гришунин К.А., Мишина Е.Д.	219
Нелинейные оптические свойства третьего порядка в допированных полимерных сегнетоэлектриках	
<u>Верховская К.А.</u> , Кривенко Т.В., Савельев В.В., Гришина А.Д., Ванников А.В.	220
Электрополевой эффект в спектрах ЭПР кристаллов SrTiO₃:Mn	
<u>Габбасов Б.Ф.</u> , Юсупов Р.В., Зверев Д.Г., Трепаков В.А., Jastrabik L., Dejneka A.	221
Оптические характеристики объемно-профилированных монокристаллов SBN:61:Tm³⁺	
<u>Лыков П.А.</u> , Папашвили А.Г., Дорошенко М.Е., Ивлева Л.И.	223
Роль водородных связей в аномалиях диэлектрических свойств кристаллогидратов и полимеров	
<u>Новик В.К.</u> , Гаврилова Н.Д.	224
Диэлектрические характеристики и эффект Мёссбауэра в керамике SrFe_{2/3}W_{1/3}O₃ при T=10-500 К	
<u>Павленко А.В.</u> , Кубрин С.П., Шилкина Л.А., Резниченко Л.А.	225
Спектральная зависимость фотоэлектрических свойств кристаллов ниобата лития	
<u>Сюй А.В.</u> , <u>Сидоров Н.В.</u> , Габаин А.А., Палатников М.Н., Штарев Д.С., Теплякова Н.А.	226
Экспериментальные и теоретические исследования нецентральных атомов кобальта в SrTiO₃	
<u>Слущинская И.А.</u> , Лебедев А.И.	227
ЯМР исследования KDP и DKDP в условиях наноконфайнмента	
<u>Ускова Н.И.</u> , Подорожкин Д.Ю., Чарная Е.В., Нефедов Д.Ю., Барышников С.В.	228
Широкополосная диэлектрическая спектроскопия релаксоров Pb(Fe_{1-x}Sc_x)_{2/3}W_{1/3}O₃	
<u>Чучупал С.В.</u> , Командин Г.А., Степанов А.В., Буш А.А., Спектор И.Е., Породинков О.Е., Гончаров Ю.Г., Серегин Д.С.	229
Исследование собственных дефектов кристаллов LiTaO₃ методом ЯМР ⁷Li и ⁶Li	
<u>Яценко А.В.</u> , Палатников М.Н., Сидоров Н.В.	230
Эффект фазопереходной усталости в трехкомпонентной системе (1-x-y)NaNbO₃ – xKNbO₃ – yCd_{0.5}NbO₃	
<u>Андрюшин К.П.</u> , Андрюшина И.Н., Дудкина С.И., Резниченко Л.А.	231

Исследование электрокалорического эффекта в твердом растворе магнониобата свинца – цинкониобата свинца (PMZN)	
Еськов А.В., <u>Анохин А.С.</u> , Пахомов О.В., Семенов А.А., Буй М.Т.	232
Появление зарядов на электродах сегнетокерамики при постоянной механической нагрузке	
Картунова Е.М., <u>Бакулин П.А.</u> , Жога Л.В.	233
Пироэлектрическое преобразование тепловой энергии с использованием пассивных схем	
<u>Добросельский К.Г.</u> , Антипин В.А., Сухоруков Г.С.	234
Бидоменный сегнетоэлектрический кантилевер для сбора бросовой механической энергии	
<u>Кислюк А.М.</u> , Савченко А.Г., Малинкович М.Д., Быков А.С., Кубасов И.В., Пархоменко Ю.Н., Жуков Р.Н., Киселев Д.А.	235
Прибор для быстрого измерения и анализа спектров импеданса пьезоматериалов	
<u>Кондаков Е.В.</u> , Павленко А.В. Иванов Н.М.	236
Перспективный высокотемпературный сенсор вибрации, колебаний и пульсаций на основе монокристаллического ниобата лития	
<u>Кубасов И.В.</u> , Быков А.С., Малинкович М.Д., Кислюк А.М., Пархоменко Ю.Н., Темиров А.А., Киселев Д.А.	237
Кристаллическая структура, физические свойства и особенности применения сегнетокерамик на основе ЦТС с контролируемой пористостью	
<u>Макарьев Д.И.</u> , Константинов Г.М., Швецова Н.А., Швецов И.А., Рыбьянец А.Н.	238
Возможность использования смесевых композитов системы «пьезокерамика – полимер» в качестве цифровых материалов для аддитивных технологий	
<u>Макарьев Д.И.</u> , Луговая М.А., Резниченко А.Н., Рыбьянец А.Н.	239
Пьезоактивные и ультразвуковые обратноосмотические, ультра- и микрофильтрационные мембраны с улучшенной селективностью и производительностью	
<u>Рыбьянец А.Н.</u> , Науменко А.А., Швецова Н.А., Щербинин С.А.	240
Конструкция для приложения электрического поля к образцу при проведении экспериментов по рассеянию рентгеновского излучения	
<u>Удовенко С.А.</u> , Андроникова Д.А., Вахрушев С.Б.	241
Емкостный dilatометр на базе измерительного комплекса PPMS QD для измерений КЛТР, магнитострикции и пироэлектрического эффекта	
<u>Фрейдман А.Л.</u> , Попков С.И.	242
Численное моделирование и оптимизация акустических полей и конструкций фокусирующих ультразвуковых преобразователей высокой интенсивности	
<u>Швецов И.А.</u> , Астафьев П.А., Мойса М.О., Щербинин С.А., Рыбьянец А.Н.	243
Пироэлектрические свойства тонких пленок титаната бария-стронция	
<u>Широков В.Б.</u> , Разумная А.Г., <u>Юзюк Ю.И.</u>	244
Конечно-элементное моделирование и экспериментальное исследование цилиндрических фокусирующих пьезопреобразователей	
<u>Щербинин С.А.</u> , Лукьянов И.И., Наседкин А.В., Швецов И.А., Рыбьянец А.Н.	245

Пути создания высокостабильного пьезокерамического материала для пьезокерамических устройств <u>Щёголева Т.В., Шахворостов Д.Ю.</u>	246
Повышение эффективности органической гетероструктуры «фотополупроводник- сегнетоэлектрик» Блинов Л.М., Лазарев В.В., <u>Юдин С.Г.</u> , Палто С.П.....	247
Модуляция поляризации в сегнетоэлектрических пленках (BaSr)TiO₃ терагерцовым полем <u>Билык В.Р.</u> , Гришунин К.А., Шерстюк Н.Э., Овчинников А.В., Чефонов О.В., Кимель А.В.	248

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Gorshunov B.P., 36
Абалмасов В.А., 99, 112
Абдулвахидов Б.К., 168
Абрамов А.С., 180
Абубакаров А.Г., 87
Акбаева Г.М., 123
Алиева Н.А., 124
Амиров А.А., 66
Андроникова Д. А., 16
Андрюшин К.П., 231
Андрюшин Н.Д., 113
Андрюшина И.Н., 159
Анохин Ал.С., 232
Анохин Ан.С., 21
Антонович А.Н., 194
Афанасьев В.П., 195
Ахматханов А. Р., 68
Бакулин П.А., 233
Балашова Е.В., 33
Барабанова Е.В., 125
Барышников С.В., 126
Билык В.Р., 248
Богданов Е.В., 22
Боднарчук Я.В., 75
Болдырев Н.А., 169
Бондарев В.С., 200
Борисов С.А., 160
Бунина О.А., 196
Бурковский Р.Г., 19
Бурханов А.И., 14
Быстров В.С., 40
Быстрова А.В., 197
Васильев С.Г., 88
Васильева Д.С., 69
Васькина Е.М., 181
Вахрушев С.Б., 15
Ведерников А.А., 52
Верховская К.А., 220
Власов Е.О., 182
Волк Т.Р., 72
Волков А.А., 91
Воронкова В.И., 128
Воротилов К.А., 31
Втюрин А.Н., 12
Габбасов Б.Ф., 221
Гаджиев Г.Г., 170
Гайнутдинов Р.В., 74
Герасимова Ю.В., 95
Гимадеева Л.В., 183
Глазунова Е.В., 62
Голицына О.М., 70, 184
Головко Ю.И., 198
Голубева Е.Н., 199
Горбатенко В.В., 100
Горев М.В., 29
Горелик В.С., 51
Гринь П.Г., 127
Гуртовой В.Г., 129
Даринский Б.М., 79
Делимова Л.А., 86
Добросельский К.Г., 234
Долин С.П., 101
Дубровин Р.М., 171
Дубровский А.А., 60
Егоров В.И., 102
Ершов А.А., 114
Есин А.А., 78
Ефимова О.В., 201
Жандун В.С., 103, 104
Жирков А.В., 185
Зайцева И.В., 130
Залесский В.Г., 81, 161
Зеленовский П.С., 17
Зубарев Я.Ю., 115
Иванова А.И., 116
Иванова Е.С., 76
Ивлиев М.П., 105
Иржак А.В., 186
Кабиров Ю.В., 172
Калгин А.В., 131
Каллаев С.Н., 65
Каменщиков М.В., 202
Камзина Л.С., 26
Картунова Е.М., 132
Киселев Д.А., 71, 203
Кисель О.Ю., 133
Кислюк А.М., 235
Князева М.А., 117
Командин Г.А., 90, 162
Кондаков Е.В., 236
Константинов Г.М., 27, 134
Королева Е.Ю., 43

Коротков Л.Н., 37, 136
Короткова Т.Н., 135
Коханчик Л.С., 73
Кричевцов Б.Б., 137
Крылов А.С., 54
Крылова С.Н., 106
Кубасов И.В., 47, 237
Лазарев А.П., 187
Лазарев В.В., 35
Лебедев А.И., 34
Леонтьев А.В., 222
Литягин Г.А., 32
Луговая М.А., 138
Лушников С.Г., 20
Лыков П.А., 223
Лянгузов Н.В., 18
Магомадов Р.М., 96
Макарова О.В., 139
Макаръев Д.И., 238, 239
Мамин Р. Ф., 23
Марковин П.А., 82
Масычев С.И., 204
Мигачев С.А., 163
Милинский А.Ю., 44, 140
Михалева Е.А., 42
Михейкин А.С., 63
Мишина Е.Д., 50
Мухортов В.М., 10
Мыльников И.Л., 107, 141
Набережных А., 41
Непчатенко В.А., 108
Новик В.К., 142, 143, 224
Нураева А.С., 144
Павленко А.В., 225
Павлов С.В., 97
Палатников М.Н., 145
Патрушева Т.Н., 205
Петрова Т.О., 206
Писарев Р.В., 58
Подгорный Ю.В., 207, 208
Политова Е.Д., 80
Половинкин Б.С., 146
Попов И.В., 147
Породинков О.Е., 209
Пронин И.П., 83, 210
Пряхина В.И., 188
Пугачев А.М., 53
Пятышев А.Ю., 118
Разумная А.Г., 56
Ратина Н.В., 119
Резниченко А.Н., 148
Рудская А.Г., 64, 173
Рыбняц А.Н., 45, 149, 240
Садыков С.А., 38
Салманов Ф.Т., 24
Сахненко В.П., 11
Сенкевич С.В., 211
Сергеева О.Н., 212
Серегин Д.С., 213
Сигов А.С., 9
Сидак В.М., 164
Сидоркин А.С., 77
Сидоров Н.В., 57, 150, 226
Силибин М.В., 151
Скалиух А.С., 109
Скрылёв А.В., 152
Случинская И.А., 227
Смирнов Л.С., 120
Смирнов М.Б., 110, 121
Солнышкин А.В., 39
Сорокин Н.И., 153
Спектор И.Е., 165
Спиваков А.А., 98
Спицин А.И., 49
Стефанович С.Ю., 85
Стрикина Е.А., 122
Таланов М.В., 28
Тер-Оганесян Н.В., 59
Титов С.В., 174
Тихонов Ю.А., 214
Толстихина А.Л., 154
Троценко В.Г., 175
Тумаркин А.В., 215, 216, 217
Турыгин А.П., 189
Удовенко С.А., 241
Удод Л.В., 176
Ускова Н.И., 228
Ушаков А.Д., 190
Федосеев А.И., 30
Флёров И.Н., 13
Фрейдман А.Л., 242
Хайбуллин Р.И., 177
Ханнанов Б.Х., 61
Харитонова Е.П., 155
Хасбулатов С.В., 179
Холкин А.Л., 89
Храмцов А.М., 48
Чезганов Д.С., 191
Черных С.Г., 186
Чувакова М.А., 192

Чулакова В.О., 193
Чучупал С.В., 229
Шахворостов Д.Ю., 246
Швецов И.А., 243
Швецова Н.А., 156
Швецова Н.А., 46
Шерстюк Н.Э., 218
Шестакова А.П., 219
Широков В.Б., 166
Шнайдштейн И.В., 25

Шур В. Я., 67
Щёголева Т.В., 246
Щербинин С.А., 245
Юдин С.Г., 247
Южаков В.В., 157
Юрасов Ю.И., 167
Юрков А.С., 84, 111
Юсупов Р.В., 55
Яценко А.В., 158, 230

ДЛЯ ЗАМЕТОК

