

На правах рукописи

Коновалов Дмитрий Александрович

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ
МАГНИТОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Казань – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
«Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского
Казанского научного центра РАН»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Петухов Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Андреев Николай Кузьмич
(Казанский государственный энергетический
университет)

доктор технических наук, доцент
Яхин Рашит Гарафутдинович
(Академия наук Республики Татарстан)

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики»,
г. Казань

Защита состоится 7 октября 2011 г. в 14 часов 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.082.01 при Казанском государственном
энергетическом университете по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская,
д. 51, зал заседаний Учёного совета, тел./факс (843)562-43-30.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просим направлять по адресу: 420066, г.Казань, ул Красносельская, д. 51, КГЭУ,
Учёному секретарю диссертационного совета Д 212.082.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского
государственного энергетического университета, с авторефератом – на сайте
<http://www.kgeu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.-м.н.

Р.И.Калимуллин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Магнитные материалы в виде тонких магнитных плёнок или слоёв на твердотельных подложках широко используются в качестве сред для хранения информации, в устройствах микро- и нанoeлектроники, в спинтронике и др. На их основе создаются разнообразные миниатюрные датчики, чувствительные к магнитным и электрическим полям, к температуре и другим физическим величинам. Кроме технологического интереса к тонким наноструктурированным слоям возникает большой интерес и к изучению низкоразмерных систем в целом. Это связано с решением целого ряда фундаментальных проблем физики, в частности физики магнитных явлений. В связи с этим, в последнее время наблюдается интенсивное развитие методов исследований, основанных на различных физических явлениях, и разработка аппаратуры для локальных измерений магнитных параметров низкоразмерных структур [1, 2].

Высокую степень локальности измерений, вплоть до субмикронных размеров, позволяет получить магнитооптический (МО) метод [3]. МО-измерения отличаются высокой чувствительностью и позволяют измерять большинство локальных магнитных параметров поверхностных слоёв образцов любой конфигурации. В частности, МО-методы удобны для исследования ионно-синтезированных слоёв [4], так как полученные структуры имеют поверхность с достаточно большим коэффициентом отражения.

Учитывая вышесказанное, а также научный и технологический бум в области нанотехнологий, можно сделать вывод о том, что разработка и конструирование приборов для изучения тонких плёнок и наноструктур является в настоящее время актуальной задачей. При этом одним из наиболее перспективных для исследования низкоразмерных структур является МО-метод.

Цель работы. Разработка методики исследования распределения локальных магнитных свойств по поверхности и создание автоматизированного комплекса для измерения магнитных характеристик поверхностей и тонких плёнок.

Постановка задач. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

- На основе анализа существующих методов измерений параметров тонких магнитных плёнок и слоёв разработать функциональную схему экспериментальной измерительной установки и методику проведения измерений.
- Сконструировать и создать установку на основе магнитооптических эффектов Керра и Фарадея для измерения локальных магнитных характеристик.
- Разработать алгоритмическое и программно-техническое обеспечение процессов измерения и обработки информации в экспериментальной измерительной установке.
- Для определения возможностей автоматизированного комплекса провести исследование образцов реальных ионно-синтезированных наноструктурированных ферромагнитных слоёв. Определить метрологические

характеристики разработанной и созданной установки.

Научная новизна работы:

- Впервые предложена методика исследования, позволяющая одновременно получать кривые намагничивания и изучать распределение локальных магнитных свойств по поверхности, путём совместного прецизионного перемещения образца с азимутальным вращением.
- Разработан и создан оригинальный универсальный автоматизированный магнитополяриметрический измерительный комплекс на базе промышленного эллипсометра ЛЭФ-3М-1, позволяющий изучать магнитные характеристики тонких плёнок и поверхностей.
- Впервые предложен способ представления распределения локальных магнитных свойств по поверхности в виде топограмм азимутальных зависимостей параметров кривых намагничивания.
- Впервые, с использованием созданного магнитополяриметрического комплекса, обнаружен разброс направлений осей магнитной анизотропии в образцах кремния, имплантированных ионами железа, во внешнем магнитном поле.

Практическая значимость работы. Разработанный и созданный прибор перспективен для проведения научных исследований новых тонкоплёночных наноструктурированных материалов, а также оперативного контроля однородности синтезированных магнитных плёнок.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в практику научно-исследовательской деятельности КФТИ КазНЦ РАН, что подтверждено соответствующим актом.

Достоверность полученных результатов определяется теоретическим обоснованием на основе использования известных положений фундаментальных наук, повторяемостью результатов измерений, их сопоставимостью с данными, полученными с помощью других методов, опубликованными в научной литературе.

На защиту выносятся:

- Методика исследования распределения локальных магнитных свойств с одновременным получением кривых намагничивания по поверхности, основанная на сканировании оптического луча при азимутальном вращении образца.
- Универсальный автоматизированный магнитополяриметрический измерительный комплекс, созданный на базе промышленного эллипсометра ЛЭФ-3М-1 и позволяющий изучать магнитные характеристики тонких плёнок и поверхностей.
- Блок управления током электромагнита, обеспечивающий автоматическое переключение направления и стабилизацию тока.
- Способ представления результатов измерений в виде топограмм азимутальных зависимостей параметров кривых намагничивания.

Личный вклад соискателя. Автор разработал электрические

принципиальные схемы и изготовил блок управления током электромагнита; сконструировал автоматизированные приводы и гониометр устройства позиционирования образца; осуществил сопряжение измерительного комплекса с компьютером; разработал алгоритмы и создал программное обеспечение, осуществляющее управление системами комплекса и процессом измерения, а также выполняющее предварительную и окончательную обработку результатов измерений.

При непосредственном участии автора разработаны функциональная и блок-схемы автоматизированного магнитополяриметрического комплекса, разработана методика исследования распределения локальных магнитных свойств по поверхности и предложен способ представления результатов исследований в виде топограмм азимутальных зависимостей параметров кривых намагничивания.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на

- Конференции молодых учёных КФТИ КазНЦ РАН, 13-14 апреля 2010 г.
- 17th International Conference on Ion Beam modifications of materials. Montréal, August 22 - 27, 2010.
- Международной Научно-технической конференции и молодёжной школе-семинаре "Нанотехнологии – 2010", Дивноморское, Россия, 19-24 сентября 2010 г.
- III Всероссийской конференции «Физические и физико-химические основы ионной имплантации», Нижний Новгород, 26-29 октября 2010 г.
- Итоговой научной конференции КФТИ КазНЦ РАН за 2010 год, Казань, 5 февраля 2011 г.
- EMRS 2011 Spring meeting Symposium B "Ion Beam Synthesis and Modification of Nanostructured Materials and Surfaces". Nice, France, May 9 – 13, 2011.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, из них 5 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК, и 1 публикация в материалах международной научной конференции.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий и относится к следующим областям исследования.

1. Методика исследования, позволяющая одновременно получать кривые намагничивания и изучать распределение локальных магнитных свойств по поверхности, соответствует п. 1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» Паспорта специальности.
2. Разработка, внедрение и испытание установки для измерения локальных магнитных характеристик, позволяющая одновременно получать кривые намагничивания и изучать распределение локальных магнитных свойств по

поверхности соответствуют п. 3 «Разработка, внедрение и испытание приборов и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами» Паспорта специальности.

3. Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов измерения и обработки информации в автоматизированной измерительной установке, а также способ представления результатов измерений в виде топограмм азимутальных зависимостей параметров кривых намагничивания соответствуют п. 6 «Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля» Паспорта специальности.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Общий объём диссертации – 118 страниц, включая 50 рисунков и 2 таблицы. Библиографический список содержит 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту. Указаны научная новизна и практическая значимость выполненной работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассмотрены существующие методы по измерению локальных магнитных свойств тонких плёнок. Обсуждены принципы, на которых они основаны, приведены основные характеристики и области их применения. Проанализированы достоинства и недостатки различных методов. Особое внимание уделено описанию магнитооптических явлений, лежащих в основе метода исследования магнитных характеристик тонких плёнок, использованного в настоящей работе. Рассмотрены конструктивные особенности современных экспериментальных МО-установок. В заключение главы сделан вывод о выборе наиболее перспективного метода исследования локальных магнитных свойств. На основании проведённого анализа проблемы сформирована цель работы.

Вторая глава диссертации посвящена методологическим вопросам исследования тонких магнитных плёнок с использованием сканирующего магнитополяриметра. В главе описан принцип работы прибора, определены концепция построения и функциональная схема прибора, обоснован выбор оптической схемы и конструктивной основы магнитополяриметрического комплекса. Численным методом на базе матричной модели магнитополяриметра проведена оценка точности регистрации петель гистерезиса. На основе анализа литературных источников определены условия выделения нужного МО-эффекта.

Существенными преимуществами предложенной и реализованной методики является наличие возможности исследования распределения локальных магнитных свойств по поверхности путём сканирования с азимутальным

вращением, с одновременным получением кривых намагничивания, а также внедрение нового способа представления результатов исследования в виде топограмм азимутальных зависимостей параметров петель гистерезиса.

Основная идея этой методики заключается в следующем. В равноудалённых точках поверхности образца в пределах области сканирования регистрируются петли гистерезиса. Такое сканирование производится многократно при изменении азимутального положения образца от 0 до 360° относительно плоскости падения зондирующего луча лазера и внешнего магнитного поля (рис. 1, а). В процессе обработки полученного массива данных для каждой точки области сканирования строятся угловые зависимости параметров петель гистерезиса (рис. 1, б). Затем строится карта распределения этих зависимостей по поверхности – топограмма (рис. 1, в). Изучая топограммы, можно определить степень и характер локальной магнитной анизотропии, поведение направлений осей лёгкого и трудного намагничивания (ОЛН и ОТН) и величины коэрцитивной силы.

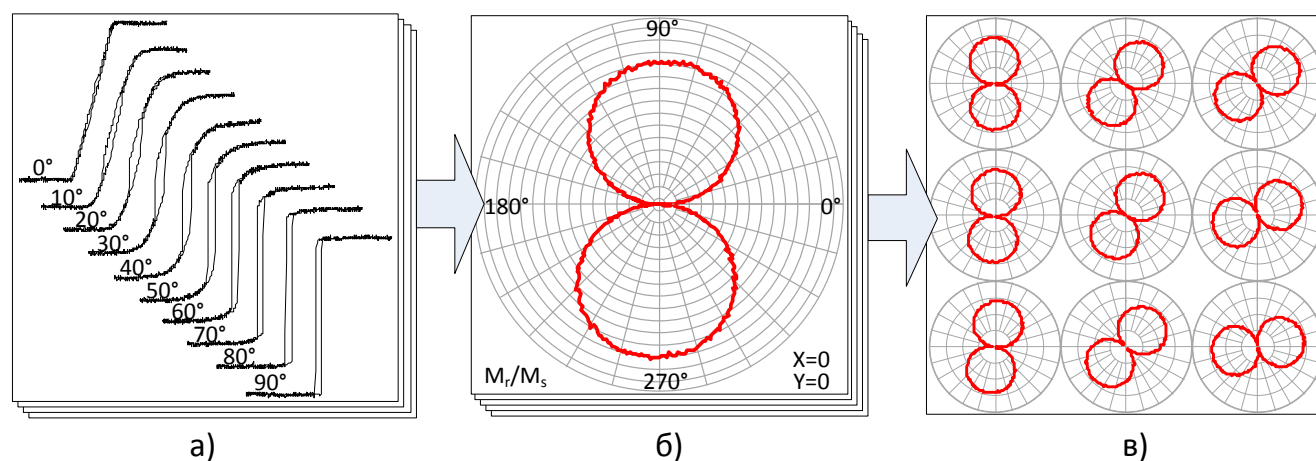


Рис. 1. Методика исследования распределения локальных магнитных свойств по поверхности.

Принцип действия магнитополяриметра основан на регистрации МО-эффекта Керра, который заключается в повороте плоскости поляризации линейно поляризованного света, отражённого от ферромагнитной поверхности. Угол поворота плоскости поляризации пропорционален намагничённости отражающей поверхности. Регистрируя зависимость угла поворота плоскости поляризации от внешнего магнитного поля, можно построить кривую намагничивания.

Предложенная методика исследования и принцип действия магнитополяриметра подразумевают наличие функциональных узлов автоматизированного магнитополяриметрического комплекса (АМК), показанных на рис. 2.

На основе анализа литературных источников для оптической системы АМК выбрана оптическая схема, обладающая наибольшей гибкостью. Она включает источник оптического излучения, поляризатор, компенсатор эллиптичности, анализатор и детектор оптического излучения. Перед анализатором, на пути следования поляризованного пучка света, помещается объект исследования. Для

увеличения соотношения «сигнал-шум» при детектировании, зондирующий луч может быть промодулирован по амплитуде или по поляризационным параметрам. Анализатор в данном случае является преобразователем вращения плоскости поляризации линейно поляризованного света в изменение его интенсивности.

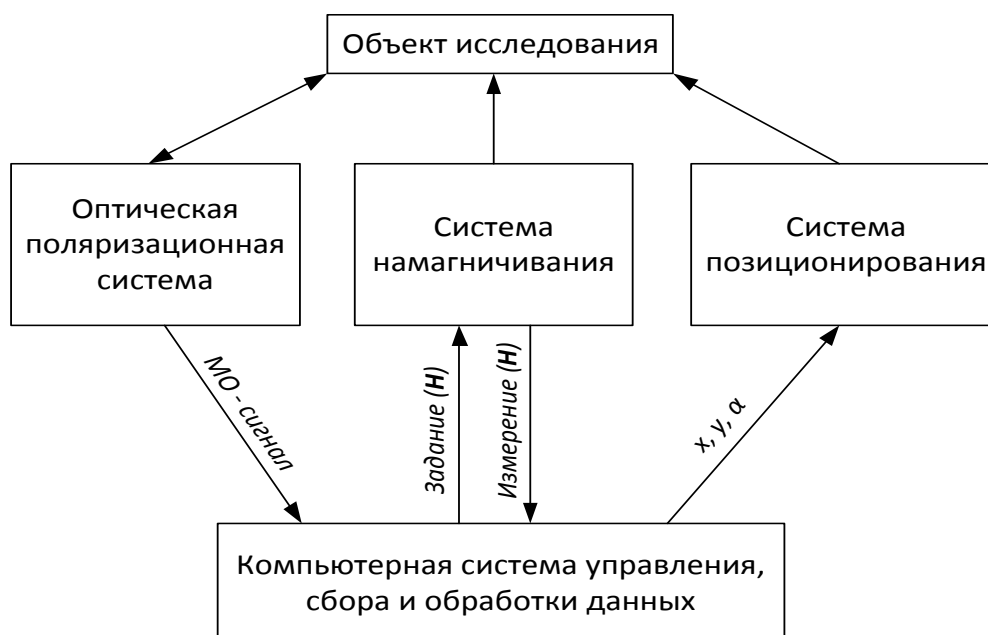


Рис. 2. Функциональная схема АМК.

Для проведения измерений на высоком метрологическом уровне конструкция оптической системы и её элементы должны быть выполнены с высокой точностью и обладать соответствующим метрологическим обеспечением. За основу был выбран промышленный эллипсометр ЛЭФ-3М-1. Этот эллипсометр имеет прецизионную оптическую систему. Его метрологическое обеспечение включает в себя методики калибровки и поверки, а также средства и оборудование, необходимые для их осуществления. Кроме того, габариты и конструкция эллипсометра позволяют устанавливать дополнительные оптические элементы и смонтировать магнитную систему достаточных габаритов.

Для нахождения аналитической зависимости между регистрируемым потоком излучения и оптическими и магнитными параметрами исследуемого образца в среде программирования LabView была реализована модель МО-системы. Для расчёта поляризационной оптической системы использовался метод Джонса [5], позволяющий применять аппарат линейной матричной алгебры. С использованием этой модели была оценена степень искажения формы петли гистерезиса от угла МО-вращения и формы петли при её регистрации с помощью анализатора. В результате анализа полученных зависимостей сделан вывод о том, что погрешность не превышает 0.1% вплоть до углов МО-вращения, равных 5°. На реальных образцах ионно-синтезированных слоёв не наблюдалось МО вращение более 1°.

В третьей главе представлена блок-схема АМК (рис. 3), подробно

рассмотрены конструктивные особенности и аппаратные решения отдельных систем АМК, приведены основные технические характеристики АМК.

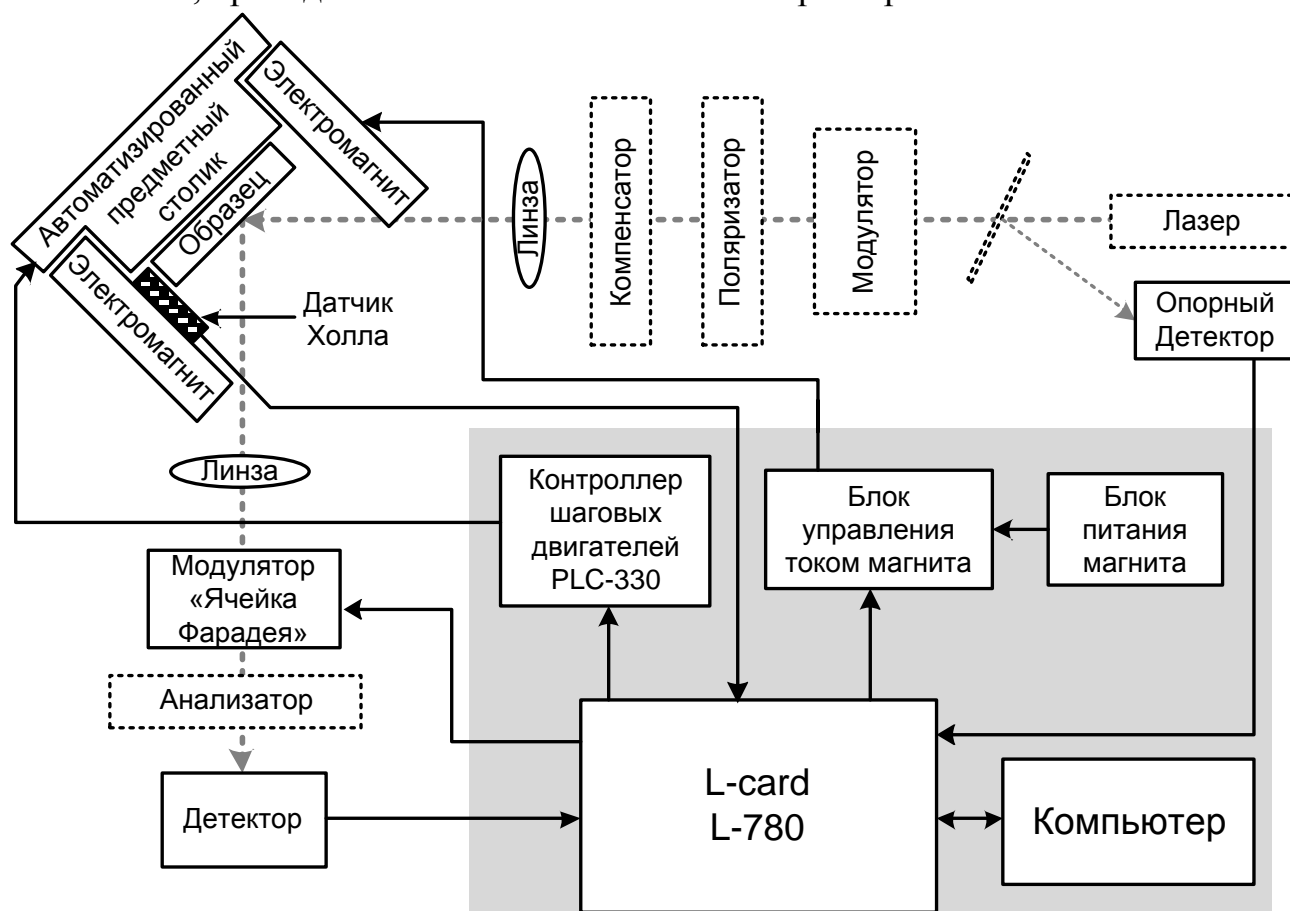


Рис. 3. Блок-схема АМК. Штатные оптические элементы ЛЭФ-3М-1 показаны пунктирной линией. Электронные компоненты комплекса выделены серым фоном.

Луч лазера, поляризованный в плече поляризатора, фокусируется на поверхности образца с помощью длиннофокусной линзы. Образец помещается между полюсами электромагнита конусообразной формы. Конфигурация обмотки магнита рассчитана и оптимизирована с использованием компьютерного моделирования. Для анализа степени однородности магнитного поля катушки был проведён расчёт на основе закона Био-Савара-Лапласа для элемента тока и численного интегрирования по окружности. Расчёты показывают, что при такой конфигурации магнитной системы существует область с относительно однородным магнитным полем. В частности, при $H = 4400 \text{ А/м}$ отклонение поля на расстоянии 1 мм составляет 4 А/м.

Для управления током электромагнита сконструирован и изготовлен простой и эффективный блок управления (БУ). Источник первичного напряжения однополярный. Значение тока задаётся внешним управляющим напряжением. Направление тока переключается автоматически при смене знака управляющего напряжения.

Обмотка электромагнита включена в диагональ моста (рис. 4), образованного мощными полевыми транзисторами. Нижние плечи моста

выполнены по схеме источника тока, управляемого напряжением (ИТУН). ИТУН выполнен по схеме стабилизатора тока на базе схемы с общим затвором с операционным усилителем в цепи обратной связи. Номиналы элементов схемы подобраны так, что изменение входного управляющего напряжения от -5 В до $+5\text{ В}$ приводит к изменению тока магнита в пределах от -10 А до $+10\text{ А}$.

Автоматическое переключение полярности достигается схемным решением на базе инвертора, обеспечивающего противофазное управление ИТУН. Управление верхними ключами осуществляется с помощью фотогальванических ячеек PVI, подключённых непосредственно к выходам операционных усилителей ИТУН. Максимальные ток и напряжение определяются параметрами используемых силовых элементов.

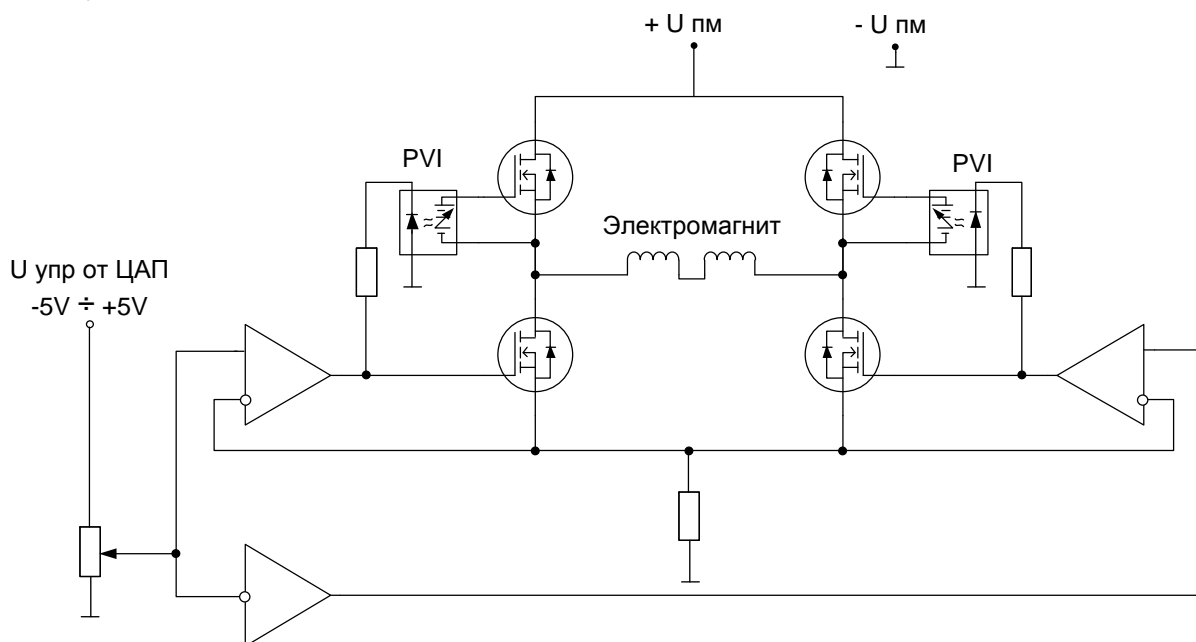


Рис. 4. Упрощённая принципиальная схема БУ током электромагнита.

Для перемещения и вращения образца сконструирован и изготовлен автоматизированный позиционер. В качестве конструктивной основы позиционера использован модифицированный штатный двухкоординатный транслятор ЛЭФ-3М-1. Он снабжён устройством перемещения на базе стандартных микрометров. Доработка хвостовой части микрометров позволила присоединить к ним шаговые двигатели. На двухкоординатный механизм установлен сконструированный в ходе работы гониометр, изготовленный из немагнитных материалов. Шаговый двигатель гониометра размещён в его основании. Ось вращения столика фиксируется в немагнитном подшипнике и напрямую связана с валом двигателя. Управление двигателями осуществляется с помощью недорогого промышленного четырёхканального контроллера для станков с числовым программным управлением PLC-330 производства российской компании Purelogic RND.

Основные технические характеристики и особенности АМК:

- Источник оптического излучения. Гелий-неоновый лазер ЛГ-72. Длина волны 630 нм. Мощность излучения 0.5 мВт.
- Система фокусировки лазерного излучения. Длиннофокусные (120 мм) фокусирующая и собирающая линзы. Минимальный размер фокусного пятна 50 мкм.
- Позиционер. Ручное и автоматическое перемещение по осям X и Y с шагом 1.25 мкм. Диапазон перемещений 25 мм. Ручное перемещение по вертикальной оси Z. Автоматическое вращение вокруг вертикальной оси с шагом 0.45 градуса.
- Виброизоляция. Магнитополяриметр установлен на металлическом основании, закреплённом на капитальных стеновых конструкциях здания.
- Магнитная система. Двухполюсный электромагнит без магнитопровода. Межполюсное расстояние 30 мм. Возможна установка сердечников. Максимальная напряжённость магнитного поля в области образца: без сердечника — 400 Э, с сердечником — 1200 Э. Магнитную систему можно разворачивать в плоскости образца на 90 градусов.
- Режимы измерения. Экваториальный эффект — интенсивность отражённого от поверхности образца света. Меридиональный эффект — интенсивность света, прошедшего через анализатор или угловые измерения с использованием модулятора на эффекте Фарадея (точность единичного измерения 0.5').
- Измерение магнитного поля. Интегральный датчик Холла SS49E фирмы Honeywell. Точность единичного измерения не хуже 0.5 Гаусс. Калибровка нуля осуществляется в начале цикла измерений.
- Закон изменения магнитного поля. Задаётся внешним управляющим напряжением от 12-ти разрядного ЦАП. Два диапазона: $\pm 70(350)$ Э и $\pm 400(1200)$ Э (в скобках — с незамкнутым сердечником). Два режима намагничивания образца. Статический — управляющая программа выставляет фиксированное значение тока электромагнита. Динамический — на выходе ЦАП формируется периодический сигнал треугольной или синусоидальной формы. Одному периоду изменения тока электромагнита соответствует массив из 4096 отсчетов.

В четвёртой главе описаны алгоритмы и программная реализация измерительного и обрабатывающего программных комплексов.

Все алгоритмы по управлению, детектированию, фильтрации, накоплению и предварительной обработке реализованы программными средствами. В результате анализа различных систем в качестве среды программирования выбрана система LabView. В приложении к автоматизации исследований среда LabView предоставляет большие возможности для разработчика и освобождает от рутинного программирования.

Взаимодействие компьютера с платой L-780 осуществляется с помощью созданной в процессе конструирования АМК библиотеки приборов для LabView.

Алгоритм исследования образца состоит из нескольких вложенных циклов: цикла измерения кривой намагничивания, цикла сканирования по поверхности и

цикла азимутального вращения образца. Задавая параметры циклов, можно реализовать разные режимы измерений. Наиболее общим случаем является получение семейства кривых намагничивания (СКН), путём сканирования с азимутальным вращением. Параметры циклов измерения задают:

- диапазон изменения величины магнитного поля;
- диапазон и шаг изменения азимутального угла;
- число циклов измерения кривой намагничивания;
- размер, положение и шаг сканирования исследуемой области.

Во время работы программы на основном экране отображаются текущая петля гистерезиса, схематичное изображение области сканирования, её азимутальное положение и точка, исследуемая в данный момент.

Каждая кривая намагничивания записывается в отдельный файл вместе с информацией о координате, азимутальном положении и другими параметрами измерения. При тщательном исследовании образца общее количество кривых намагничивания достигает нескольких тысяч. Ручная обработка такого массива информации практически невозможна. С этой задачей справляется разработанный комплекс программных модулей, объединённых одной интерфейсной оболочкой, созданный также в среде LabView. Для каждой петли гистерезиса вычисляются значения приведённой остаточной намагниченности и коэрцитивной силы, которые затем сортируются по координатам и азимутам.

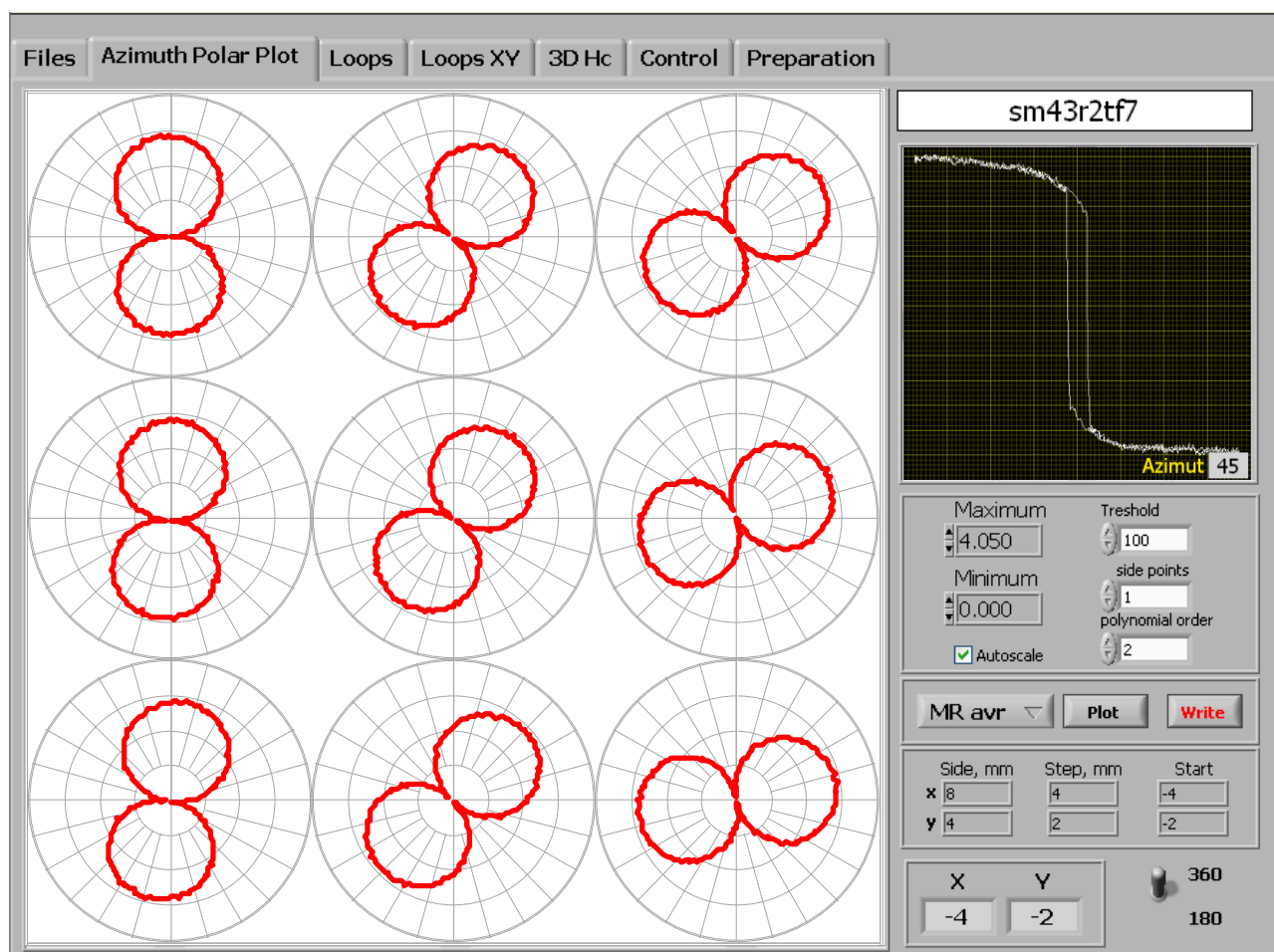


Рис. 5. Интерфейс программного комплекса обработки СКН

Результатом работы программного комплекса являются топограммы – карты распределения угловых зависимостей в полярных координатах значений M_r/M_s (рис. 5) или H_c по поверхности образца в пределах исследованной области. Графический образ топограммы можно сохранить в растровом или векторном форматах. В каждой исследуемой точке имеется возможность вывода на экран зарегистрированных кривых намагничивания для всех значений азимута.

В пятой главе рассмотрены вопросы метрологии. Проанализировано влияние погрешностей позиционирования образца на точность исследований. Приведены результаты исследований ферромагнитных слоёв, полученных методом ионно-лучевого синтеза (ИЛС). Для подтверждения достоверности полученных результатов приведены сравнительные результаты исследований, выполненных МО-методом на созданном магнитополяриметре, и методом индукционной магнитометрии на коэрцитивном спектрометре.

Пространственное разрешение сканирующего поляриметра определяется размером лазерного пятна и точностью, с которой оно может быть позиционировано на поверхности образца. Луч лазера падает на поверхность образца под углом 45° , поэтому лазерное пятно имеет форму эллипса. Профиль лазерного пятна по длинной оси эллипса, определённый методом «ножа» [6], имеет гауссово распределение с полушириной 65 мкм. Точность повторяемости X-Y транслятора 5 мкм. Точность совмещения фокусного пятна с осью вращения образца ± 30 мкм. Точность повторяемости азимутального позиционирования образца 1.5 угловые минуты. Время затухания колебаний системы гониометр-позиционер не более 0.3 сек. Смещение фокусного пятна на краях области сканирования при угле образца 5.5 мкм/см не более 4 мкм. Чувствительность АМК (по результатам косвенной оценки) не менее 10^{-8} emu.

Исследования локальных магнитных свойств тонких слоёв, полученных методом ИЛС, выполненные на созданном АМК, подтвердили то, что предложенный способ представления результатов исследования в виде топограмм обладает информативностью и наглядностью. При этом предложенная методика позволяет не только получать качественную картину распределения анизотропии магнитных свойств по поверхности образца, но и определять количественные характеристики.

На рис. 6 приведены типичные зависимости МО-сигнала от величины магнитного поля (петли гистерезиса – а, б), полученные на АМК. Угловая зависимость (в) приведённой остаточной намагниченности M_r/M_s получена путём обработки параметров 200 петель гистерезиса. Топограмма (г) угловых зависимостей M_r/M_s построена на основе результатов МО-сканирования с шагом 420 мкм по осям XY и 9° по азимуту.

Сравнительные исследования, выполненные методом индуктивной магнитометрии, подтвердили достоверность результатов, получаемых на созданном АМК. Они также показали преимущество МО-метода по сравнению с индуктивной магнитометрией при исследовании тонких ферромагнитных слоёв благодаря большей чувствительности, локальности и отсутствию влияния подложки на результаты измерений.

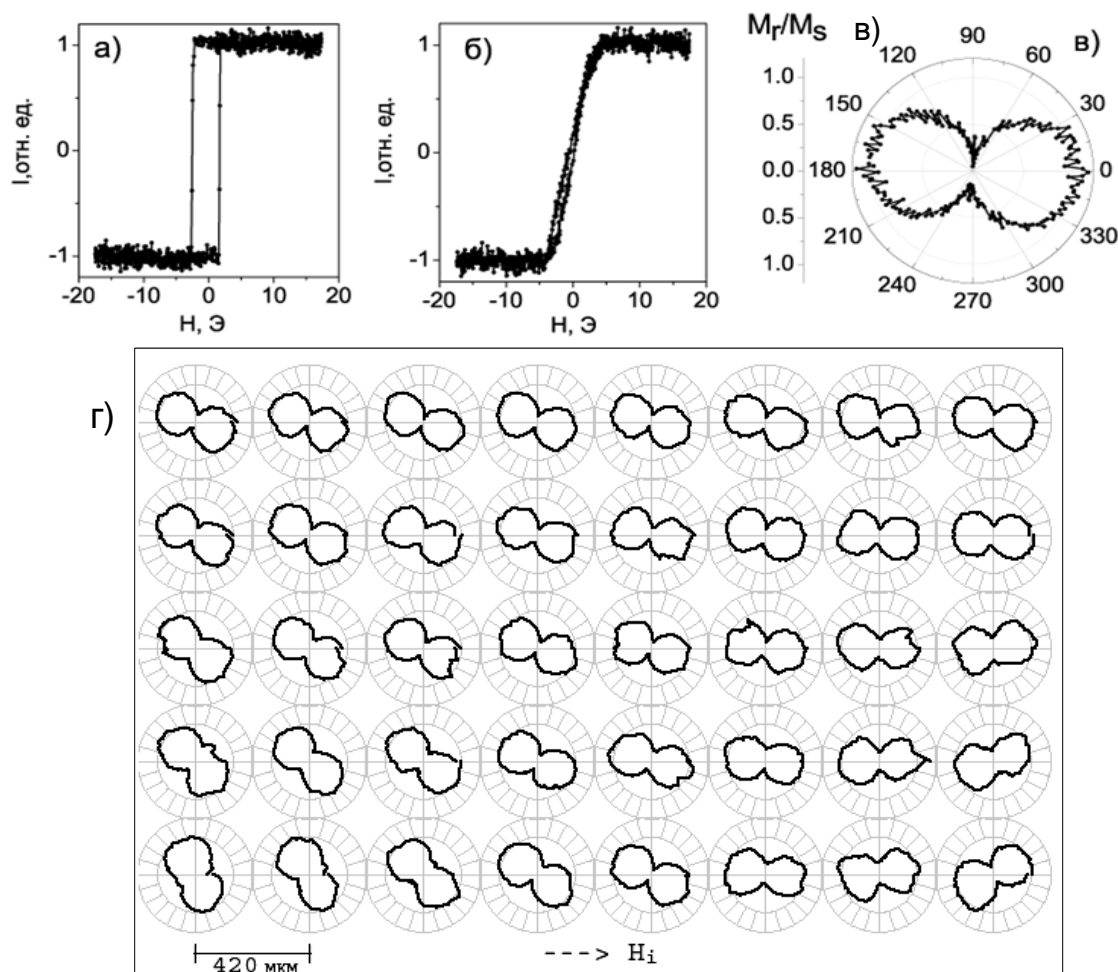


Рис. 6. Результаты МО-исследования магнитного слоя, полученного методом ИЛС во внешнем магнитном поле. (КДБ-10 (111), Fe+, энергия 40 кэВ, плотность ионного тока 5 мкА/см² при комнатной температуре, доза имплантации $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $H_i=1200 \text{ Э}$): а) петля гистерезиса в направлении ОЛН; б) петля гистерезиса в направлении ОТН; в) угловая зависимость приведённой остаточной намагниченности M_r/M_s ; г) топограмма угловых зависимостей M_r/M_s .

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Намечены перспективы дальнейшего развития.

В приложении приведено описание внутренней структуры платы сбора данных L-Card L-780. Описаны принципы построения виртуальных приборов в среде LabView при реализации операций ввода-вывода с использованием платы L-780. Приведены блок-диаграммы виртуальных приборов, реализующих асинхронные и потоковые операции ввода-вывода.

Основные результаты и выводы:

1. Впервые предложена и реализована методика исследования, позволяющая одновременно получать кривые намагничивания и изучать распределение локальных магнитных свойств по поверхности, путём совместного прецизионного перемещения образца с азимутальным вращением.
2. Создан автоматизированный магнитополяриметрический измерительный

комплекс на базе промышленного эллипсометра ЛЭФ-3М-1, позволяющий получать магнитные характеристики тонких плёнок. Созданный магнитополяриметр имеет резерв для улучшения разрешающей способности за счёт усовершенствования системы фокусировки.

3. Разработан и изготовлен блок управления током электромагнита, обеспечивающий автоматическое переключение направления и стабилизацию тока.
4. Впервые предложен и реализован способ представления распределения локальных магнитных свойств по поверхности в виде топограмм азимутальных зависимостей параметров кривых намагничивания.
5. Определены и проанализированы метрологические характеристики разработанного прибора.
6. С использованием созданного магнитополяриметрического комплекса изучено влияние внешних магнитных и механических полей на образование анизотропных магнитных плёнок при ионно-лучевом синтезе. При этом впервые обнаружена дисперсия направлений осей анизотропии в образцах кремния, имплантированных ионами железа, во внешнем магнитном поле.
7. Разработанный и созданный прибор перспективен для проведения научных исследований тонкоплёночных наноструктурированных материалов, а также для оперативного контроля однородности синтезированных плёнок.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. **Коновалов Д.А.**, Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Нуждин В.И. Автоматизированный комплекс для исследования магнитных характеристик ферромагнитных материалов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 5-6. С. 122-129
2. **Коновалов Д.А.**, Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Матухин В.Л., Петров Г.И. Валеев В.Ф. Программное обеспечение автоматизированного комплекса для исследования магнитных характеристик ферромагнитных материалов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 7-8. С. 134-140.
3. **Коновалов Д.А.**, Гумаров Г.Г., Петухов В.Ю., Халиков Р.А., Нуждин В.И. Исследование магнитных свойств ионно-синтезированных слоёв методом сканирующей магнитополяриметрии // Учёные записки Казанского государственного университета. Серия Физико-математические науки. 2010. Т. 152. кн. 1. С. 49-55.
4. Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г., **Коновалов Д.А.**, Петухова Л.В., Халиков Р.А. Исследование магнитной анизотропии тонких наноструктурированных плёнок, полученных методом ионно-лучевого синтеза в магнитном поле // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 9. С. 892-894.
5. Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Gumarov A.I., Khalikov R.A., **Kononov D.A.**, Valeev V.F. and Khaibullin R.I. MOKE investigation of silicide films ion-beam synthesized in single-crystal silicon // Nucl. Instr. And Meth. B. 2011. doi:10.1016/j.nimb.2011.01.043.

6. Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г., Коновалов Д.А., Петухова Л.В., Халиков Р.А. Наноструктурированные ферромагнитные плёнки, полученные методом ионно-лучевого синтеза в магнитном поле // Труды Международной Научно-технической конференции и молодежной школы-семинара "Нанотехнологии – 2010" 19-24 сентября 2010, Дивноморское, Россия. – Таганрог, Издательство Технологического института Южного федерального университета, 2010. Часть 1. С. 172-174.

Список цитируемой литературы:

1. Бухараев А.А., Овчинников Д.В., Бухараева А.А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор) // Заводская лаборатория. 1997. № 5. С. 10-27.
2. Беляев Б.А., Изотов А.В., Лексиков А.А. Сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса для диагностики тонких магнитных плёнок // Заводская лаборатория. Диагностики материалов. 2001. Т. 67. № 9. С. 24-33.
3. Кринчик Г.С., Нурмухамедов Г.М., Золотарев В.П. Установка для измерения магнитных характеристик ферромагнетика на микроучастках поверхности размером $\sim 1 \text{ мкм}^2$ // ПТЭ. 1964. № 4. С. 171-175.
4. Gumarov G.G., Petukhov V.Yu., Zhikharev V.A., Valeev V.F., Khaibullin R.I. Investigation of Magnetic Anisotropy of Silicide Films Ion-beam Synthesized in External Magnetic Field // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2009. V. 267. P. 1600-1603.
5. Jones R.C. New calculus for the treatment of optical systems. I-VIII // J. Opt. Soc. Amer. 1941. V. 31. No. 7. P. 488-493. ; 1948. V. 38. No. 8. P. 671-685. ; 1956. V. 46. No. 2. P. 126-131.
6. Беляев Б.Ф., Гущин В.Л., Иванов С.А., Тарасов А.Л. Метод измерения размеров фокусных пятен рентгеновских трубок // Электронная техника. Сер. 4. 1979. Вып. 6. С. 56-58.

Подписано в печать 24.08.2011 г.

Форм. бум. 60x84 1/16. Печ. л. 1. Тираж 100. Заказ № 251.

Изготовлено в полиграфическом центре «Отечество»
420126, г.Казань, ул.Чистопольская, д.27а