

На правах рукописи

Косырев Николай Николаевич

МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЙ  
КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ  
НАНОСТРУКТУР В УСТАНОВКЕ МОЛЕКУЛЯРНО-  
ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2008

Работа выполнена в лаборатории физики магнитных явлений Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Овчинников С.Г.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Ким П.Д.

доктор физико-математических наук  
Слабко В.В.

Ведущая организация: Институт физики полупроводников СО РАН  
г. Новосибирск

Защита состоится 12 декабря 2008 г. в 14.30 час.  
на заседании диссертационного Совета Д 003.055.01 при Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН по адресу:  
660036, Красноярск, Академгородок 50, стр. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Автореферат разослан 11 ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ. – мат. наук \_\_\_\_\_

А.Н. Втюрин

## Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время весьма актуален вопрос исследования свойств поверхностей тонких пленок, которые имеют достаточно большую перспективу использования в устройствах наноэлектроники. Однако, измерение параметров пленок нанометровых толщин имеет свою специфику. В частности, при получении наноструктур в условиях сверхвысокого вакуума, встает проблема контроля их свойств *in situ* непосредственно в процессе изготовления – исследование таких структур *ex situ* на воздухе зачастую невозможно, в связи с высокой химической активностью многих материалов, используемых в данной области. Здесь большое преимущество имеют оптические методы, т.к. не оказывают влияния на исследуемый образец и имеют определенную гибкость при использовании *in situ* непосредственно в сверхвысоковакуумной камере. В частности, известен метод эллипсометрии, основанный на анализе изменения поляризации света при отражении от исследуемого образца. Известен также метод магнитооптического эффекта Керра (МОКЕ). У обоих методов схожи оптические схемы измерений, а по набору измеряемых параметров они взаимно дополняют друг друга. Метод эллипсометрии используется для измерения оптических постоянных преломления и поглощения материала, а также для измерения толщин тонких пленок. Метод МОКЕ применяется для изучения магнитных свойств материала. Оба метода удовлетворяют нас, т.к. являются неразрушающими, не изменяющими свойства материала и обладающие достаточной чувствительностью. В этой связи достаточно привлекательной выглядит идея создания прибора, объединяющего в себе метод эллипсометрии и МОКЕ.

Работа выполнена в рамках программ ОФН 2.4.2 «Спинтроника», комплексного интеграционного проекта СО РАН № 3.5, а также гранта РФФИ 07-03-00320.

Цели и задачи работы. Целью данной работы является создание автоматизированного эллипсометрического и магнитооптического комплекса для исследования магнитных наноструктур. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создать керровский магнитометр для *in situ* измерений на базе лазерного эллипсометра ЛЭФ-757.
2. Разработать блок управления для прецизионного слежения за температурой испарителей.
3. Создать программное обеспечение, реализующее обратную связь эллипсометр – технологическая установка для получения структур с заданными свойствами.
4. Разработать методику исследования оптических свойств структур Fe/Si методом эллипсометрии и реализовать алгоритмы, позволяю-

щие в реальном времени во время напыления структур вычислять толщину, скорость роста, а также оптические постоянные.

5. Исследовать магнитные свойства ультратонкой пленки Fe на различных подложках и двухслойной структуры  $Du_{1-x}Ni_x/Ni$ .

### Научная новизна

Для структур  $(Fe/Si)_n$  с  $n=1\div 5$  впервые проведены измерения *in situ* оптических параметров методом эллипсометрии. Определены толщины Fe и Si как в виде отдельных слоев, так и в составе структур Fe/Si. Исследованы начальные стадии роста структур  $(Fe/Si)_n$ . С помощью эллипсометрической методики показан островковый рост Fe и Si на подложке Si при получении структур  $(Fe/Si)_n$ . Получены геометрические характеристики островков, согласующиеся с результатами измерений структур  $(Fe/Si)_n$  другими методами.

Впервые исследованы магнитные свойства структур  $Du_{(1-x)}Ni_x/Ni$  при  $x\sim 0,05$  *in situ* непосредственно в сверхвысоковакуумной камере в процессе напыления с помощью магнитооптического эффекта Керра. Показано возникновение ферромагнитного упорядочения в пленках  $Du_{(1-x)}Ni_x/Ni$  при  $x > 0.05$ , при комнатной температуре.

Практическая ценность. Разработанный автоматизированный комплекс может применяться в других установках молекулярно-лучевой эпитаксии для получения полупроводниковых и магнитных наноструктур. Полученные результаты эллипсометрического анализа структур  $(Fe/Si)_n$ , которые представляют большой интерес для исследования и изготовления устройств спинтроники, важны для воспроизводимого получения таких структур с заданными свойствами.

### Основные положения, выносимые на защиту.

1. Возможность измерения эффекта Керра *in situ* с помощью установки, построенной на базе лазерного эллипсометра ЛЭФ-757.
2. Демонстрация ферромагнитного упорядочения в структуре  $Du_{(1-x)}Ni_x/Ni$  при комнатной температуре на основе измерений эффекта Керра, впервые проведенных для таких структур *in situ*.
3. Методика исследования оптических свойств структур Fe/Si методом эллипсометрии. Измерение *in situ* толщины растущих пленок Fe и Si. Исследование начальных стадий роста пленок Fe и Si.
4. Конструктивное решение системы управления испарителями в установке молекулярно-лучевой эпитаксии на основе эллипсометрического контроля.

Апробация. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на ряде конференций: Euro-Asian symposium “Trends in magnetism” (Красноярск-2004), Euro-Asian symposium “Magnetism on a nanoscale” (Казань-2007), Международная школа-семинар «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (Москва-2004), Всероссийский симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника-2008» (Нижний Новгород-2008), Всероссийской научно-технической конференции «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение» (Красноярск -2003), Всерос. науч. конф. «Решетневские чтения» (Красноярск-2003), Всероссийское совещание «Кремний - 2006» (Красноярск-2006), Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых – ВНКСФ (Красноярск-2003, Москва-2004, Новосибирск-2005), Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – (Новосибирск-2003)

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 15 печатных работах, включая 3 статьи в периодических изданиях из списка ВАК.

Личный вклад автора заключается в участии, совместно с руководителем, в постановке задачи, в активном участии в разработке прибора для измерения магнитооптического эффекта Керра, в самостоятельном проведении измерений, в обработке и анализе полученных данных, в интерпретации результатов, совместно с руководителем и научным консультантом и написании программного обеспечения разрабатываемого комплекса.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 108 страницах машинописного текста, иллюстрируется 49 рисунками и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений.

## Содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность темы; определены основные вопросы, решаемые в диссертации, обосновывается выбор объектов исследований.

Первая глава является обзорной. Рассмотрены теоретические основы метода эллипсометрии, прямая и обратная задача эллипсометрии в рамках простейших моделей отражающих систем: однородная полубесконечная среда, однослойные системы, многослойные системы. Также приводится макроскопическое описание эффекта Керра, рассматривается поверхностный магнитооптический эффект Керра в пределе малой толщины пленки.

Далее рассматриваются различные экспериментальные схемы для исследования поверхностного магнитооптического эффекта Керра, а также основные методы измерения эллипсометрических параметров  $\psi$  и  $\Delta$ .

На основании литературного обзора и патентного поиска был сделан вывод, что в мире не существует аналогов *in situ* прибора для одновременного измерения и магнитооптического эффекта Керра и эллипсометрических параметров.

В конце главы формулируются задачи настоящего диссертационного исследования.

Во второй главе рассматривается методика исследования наноструктур  $(\text{Fe/Si})_n$  с помощью *in situ* и *ex situ* эллипсометрии. Проводится контроль качества обработки подложек кремния методом *ex situ* спектральной эллипсометрии. Далее методом *in situ* лазерной эллипсометрии исследованы начальные стадии роста слоев Fe и Si на подложке монокристаллического кремния. Экспериментальные данные хорошо описываются моделью эффективной среды (приближение Бругемана) в представлении островков в виде полусферических капель [1]. На рис. 1 представлены эллипсометрические данные при напылении пленки Fe.

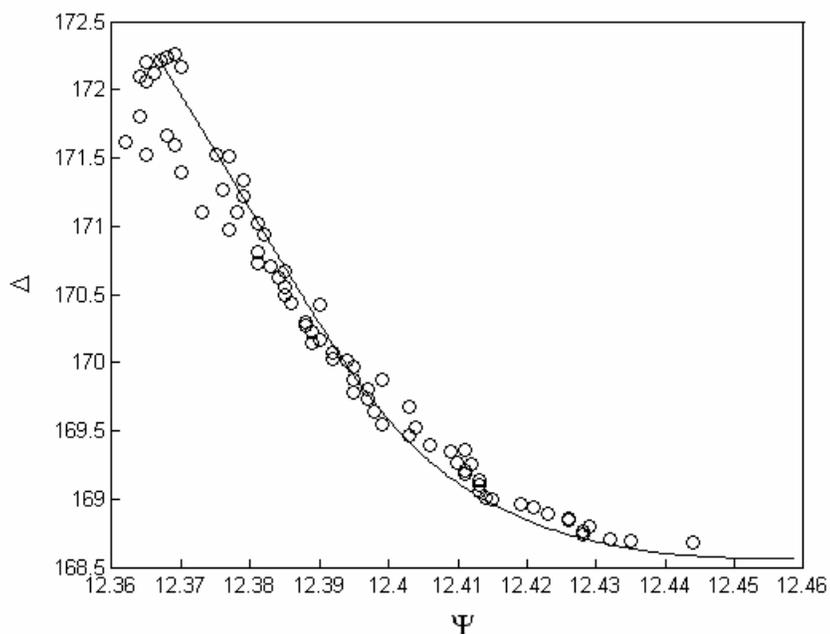


Рис. 1. Эллипсометрическое исследование начальных стадий роста пленки Fe.

Был выявлен островковый характер роста пленок, причем анализ оптических постоянных показал, что островки преимущественно состоят из силицида железа, что согласуется с работами [2,3]. Определены характерные размеры островкового слоя 10-13 Å, что тоже согласуется с [2,3].

Методом *in situ* эллипсометрии был исследован рост как однослойных пленок Fe и Si, так и многослойных структур  $(\text{Fe/Si})_n$  с  $n=1\div 5$ . На рис. 2 приведены экспериментальные данные записанные при напылении двухслойной структуры Fe[100 Å]/Si [300 Å]. Здесь участок 1 соответствует росту слоя железа, 2 – росту кремния соответственно. С помощью приближения многослойной системы [4] вычисляются значения  $\psi$  и  $\Delta$  для различных толщин.

Вариацией параметров в модели добиваются совпадения теоретической и экспериментальной кривых. На рис. 2 построен ряд модельных кривых для Fe, каждая из которых соответствует определенному значению показателя преломления (с шагом 0,196).

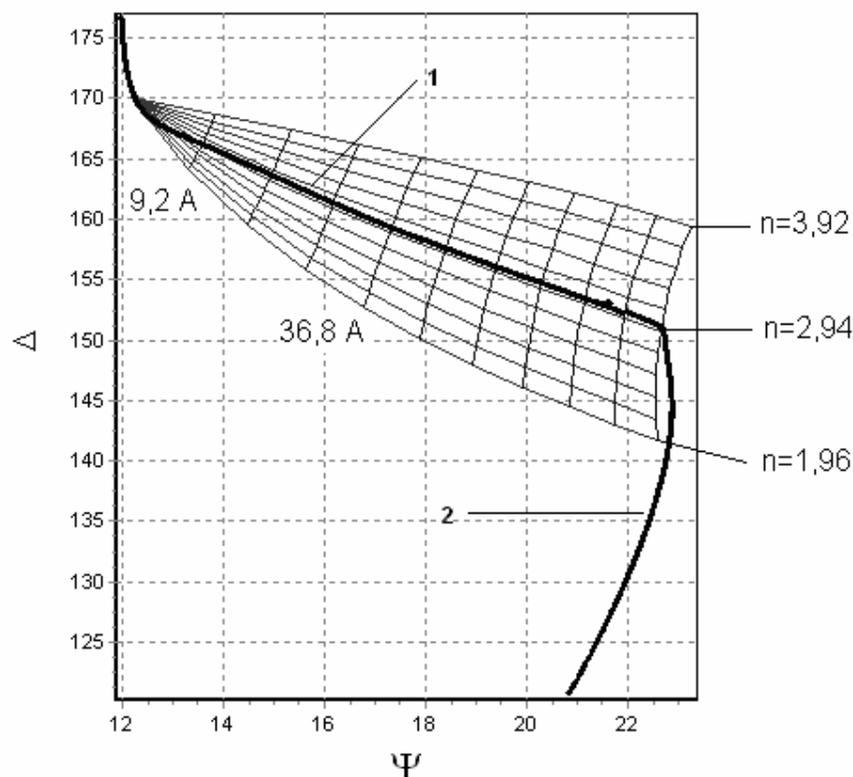


Рис.2 Эллипсометрические исследования роста двухслойной структуры Fe[100 Å]/Si[300 Å]. Участок 1 соответствует росту слоя железа, 2- росту слоя кремния.

Поперечные кривые соответствуют различным толщинам (с шагом 9,2 Å). Такая сетка из кривых с разными показателями поглощения и кривых равной толщины называется номограмма – удобный способ определять параметры пленки во время ее роста.

Третья глава посвящена разработке установки для измерения магнитооптического эффекта Керра *in situ* непосредственно внутри высоковакуумной камеры. Установка была интегрирована в сверхвысоковакуумную камеру системы молекулярно – лучевой эпитаксии «Ангара», модернизированной для напыления магнитных материалов [5]. Она состоит из двух частей: оптической измерительной части и блока перемещения образца.

В результате анализа различных оптических схем, проведенного в главе 1, была выбрана схема [6], реализованная в эллипсометре ЛЭФ-757 Институтом физики полупроводников СО РАН [7]. Он имеет следующие преимущества:

1) Разделение светового пучка в анализирующей части на две компоненты обеспечивает минимальный набор оптических элементов (поляризатор и анализатор) в одном из каналов. Это позволяет минимизировать систематические погрешности связанные с нестабильностью оптических компонент, что становится важным при регистрации тонких магнитооптических эффектов.

2) Отсутствие вращающихся элементов обеспечивает высокую надежность прибора

3) Высокое быстродействие (1 измерение за 40 мс) позволяет накапливать и усреднять данные с целью улучшения соотношения сигнал/шум, а также проводить исследования быстропротекающих процессов.

3) Высокая дифференциальная чувствительность - любое изменение эллипсометрических параметров  $\psi$  и  $\Delta$  можно однозначно связать с изменением в исследуемой системе, в связи с отсутствием вращающихся элементов.

4) Испытания данного эллипсометра *ex situ* в режиме измерения эффекта Керра дали рекордную для безмодуляционной методики чувствительность  $\delta\alpha \approx 0.001^\circ$

5) Электронная часть прибора выполнена на современной элементной базе и высоком техническом уровне.

6) Оригинальное использование в качестве фазосдвигающего элемента ромба Френеля вместо традиционного  $\lambda/4$  - компенсатора позволяет в последующем заменить источник света на лампу с монохроматором для проведения спектральных измерений - в отличие от  $\lambda/4$ -пластинки свойства ромба практически не зависят от длины волны.

7) Эллипсометр поставляется в комплекте со специальной библиотекой (c757.dll) и SDK (software development kit), что позволяет создавать любое программное обеспечение для управления технологическим процессом

На рис. 3 показано устройство блока перемагничивания образца. Магнитное поле создается постоянным магнитом 1 кольцеобразной формы, выполненным из NdFeB. Величина поля на поверхности магнита составляет 42 мТл. Магнит может вращаться с помощью манипулятора, и тем самым создавать в области образца вращающееся магнитное поле. Напряженность магнитного поля в определенном направлении в плоскости осаждаемой пленки является периодической функцией угла поворота магнита.

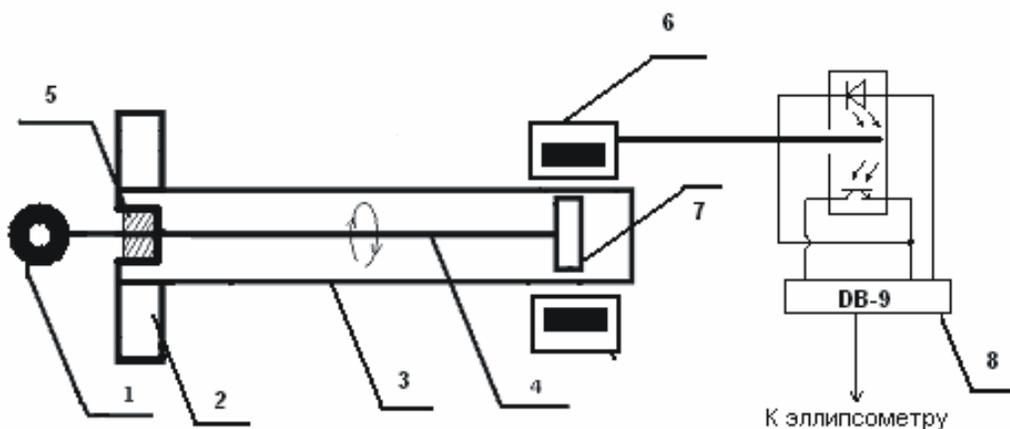


Рис. 3. Упрощенная схема блока перемагничивания образца. 1 - постоянный NdFeB магнит, 2 - фланец, 3 - герметичная трубка, 4 - вращающаяся штанга, 5 – подшипник, 6 - система из двух SmCo магнитов, 7 - железный сердечник, 8 - оптопара

Измерение эффекта Керра происходит следующим образом. В процессе равномерного вращения магнита манипулятор прерывает сигнал оптопары и задний фронт образованного импульса является реперной точкой, относительно которой происходит отсчет угла поворота магнита. Угол поворота плоскости поляризации  $\alpha$  измеряется через равные интервалы времени и записывается в массив данных вместе с текущим углом поворота манипулятора. Для уменьшения ошибок записываются результаты измерений для нескольких циклов вращения (обычно 8-10) и затем усредняются. Диапазон изменения  $\alpha$  составляет всего несколько сотых долей градуса. Однако благодаря аппаратным мерам, а также за счет усреднений ошибка измерения угла оказывается довольно малой  $\delta\alpha \approx 0.001^\circ$  и позволяет уверенно измерять угол поворота плоскости поляризации в пленке.

В настоящей главе также сообщаются результаты магнитных исследований *in situ* непосредственно в сверхвысоковакуумной ростовой камере сверхтонких пленок Fe (0,5 нм) на различных подложках, пленок Ni и двухслойной структуры  $Du_{(1-x)}Ni_x/Ni$  нанометровых толщин. Образцы получены термическим испарением в высоком вакууме в установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Ангара. Напыление производилось на подложки при температуре  $250^\circ\text{C}$ . Предварительный вакуум составлял  $10^{-6}$  Па, рабочий вакуум  $10^{-5}$  Па. Скорости роста пленок и толщина определялись *in situ* с помощью лазерного эллипсометра и составляли 0,003 нм/с для никеля, 0,007 нм/с для железа и 0,126 нм/с для диспрозия. В качестве инструмента исследования магнитного состояния пленок использовался поверхностный магнитооптический эффект Керра.

**Результаты исследований пленок железа.** На рис. 4 показаны величины сигнала SMOKE для пленок Fe с толщинами 0,5 нм и 1,5 нм. Для толщины  $d=1,5$  нм сигнал почти одинаков для подложек из стекла и монокристаллического кремния, в то время как для  $d=0,5$  нм пленка на стекле уверенно показывает наличие ферромагнитного порядка при  $T=300$  К (рис. 4а), а пленка на Si характеризуется более размытым сигналом (рис. 4б). Следует отметить, что пленки на стекле и на кремнии изготавливались одновременно, т.е. в ростовую камеру было загружено две подложки. Таким образом, можно исключить флуктуацию технологических условий при изготовлении пленок. Мы связываем различие экспериментальных данных с образованием силицидов железа в случае подложки Fe в смеси фаз, среди которых есть и магнитная фаза  $Fe_3Si$  и немагнитные  $FeSi$  и  $FeSi_2$ . Поэтому для тонкой пленки 0,5 нм Fe/Si практически весь слой состоит из силицидов, что и дает уменьшение сигнала, а для подложки из стекла пленка с толщиной 0,5 нм содержит 2 атомных слоя Fe и показывает магнитное упорядочение.

В то же время для толщин  $d=1,5$  нм сигналы похожи по форме (рис. 4в,г), что говорит о том, что для Fe/Si только часть пленки Fe образует силициды железа на границе раздела с подложкой. Этот вывод согласуется с оценкой толщины интерфейса 0,9 нм, полученной измерениями намагниченности *ex situ* для многослойных структур  $(Fe/Si)_n$  [3].

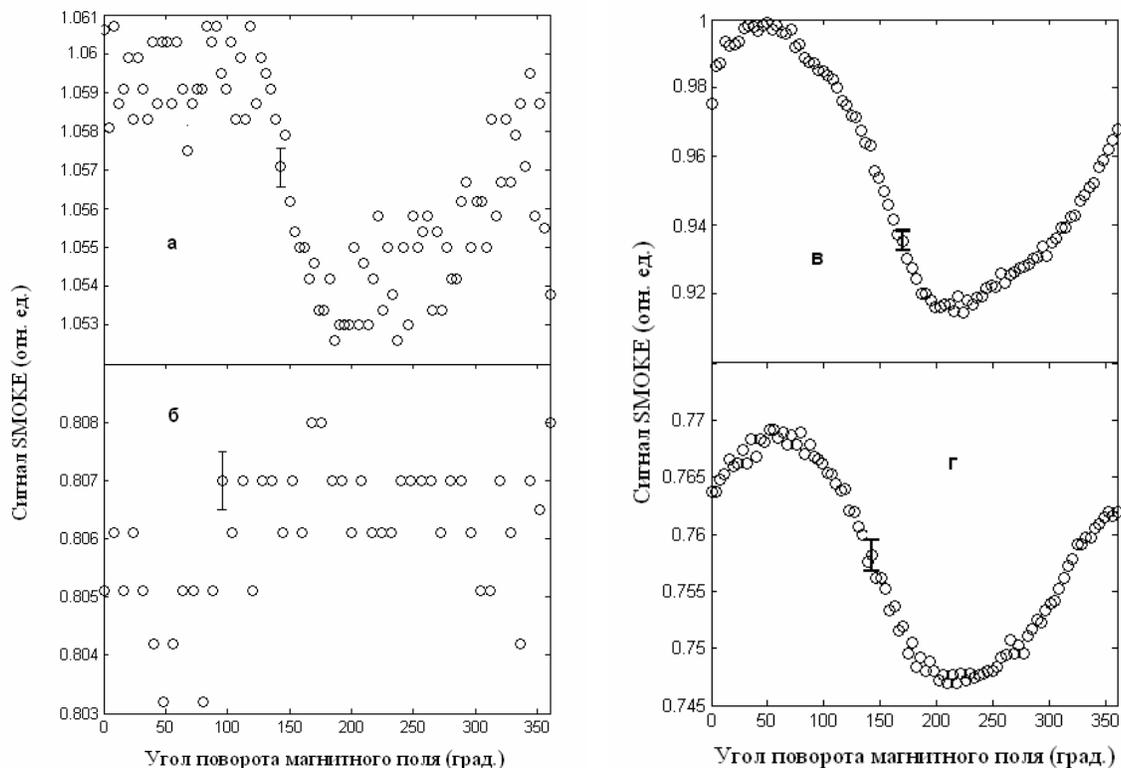


Рис.4. Зависимость величины сигнала SMOKE от направления магнитного поля для пленок Fe: (а)- толщина 0,5 нм, подложка-стекло, (б) - толщина 0,5 нм, подложка-кремний, (в)- толщина 1,5 нм, подложка-стекло, (г)- толщина 1,5 нм, подложка-кремний

**Результаты исследования структуры  $Du_{(1-x)}Ni_x/Ni$ .** Диспрозий давно привлекает внимание в связи с чрезвычайно большой величиной магнитного момента и возможностями прикладного применения наноструктур, включающих диспрозий в сочетании с другими металлами, полупроводниками или диэлектриками. Однако, отсутствие магнитного порядка в металлическом диспрозии при комнатных температурах требует охлаждения ниже 100 К, что сужает возможности его применения.

Недавно в [8] было обнаружено магнитное упорядочение диспрозия при комнатной температуре в двухслойных пленках  $Du_{(1-x)}Ni_x/Ni$  при величине  $x \sim 0.05$ . Измерения магнитных свойств двухслойных структур  $Du_{(1-x)}Ni_x/Ni$  в [8] проводились *ex situ*, на открытом воздухе. Из-за высокой склонности к окислению  $Du$  изготавливался толстый (более 60 nm) слой, по меньшей мере половина которого окислялась.

В настоящей работе приведены результаты первых *in situ* измерений магнитных свойств методом МОКЕ, что позволило исследовать тонкие слои без влияния окислов и непосредственно продемонстрировать наличие магнитного порядка в слое  $Du_{(1-x)}Ni_x/Ni$  при комнатной температуре. На рис. 5 показано изменение сигнала эффекта Керра в той же геометрии, что и на рис.4.

Свет отражается от слоя DyNi толщиной 5 нм двухслойной структуры Ni[8nm]/DyNi[5nm].

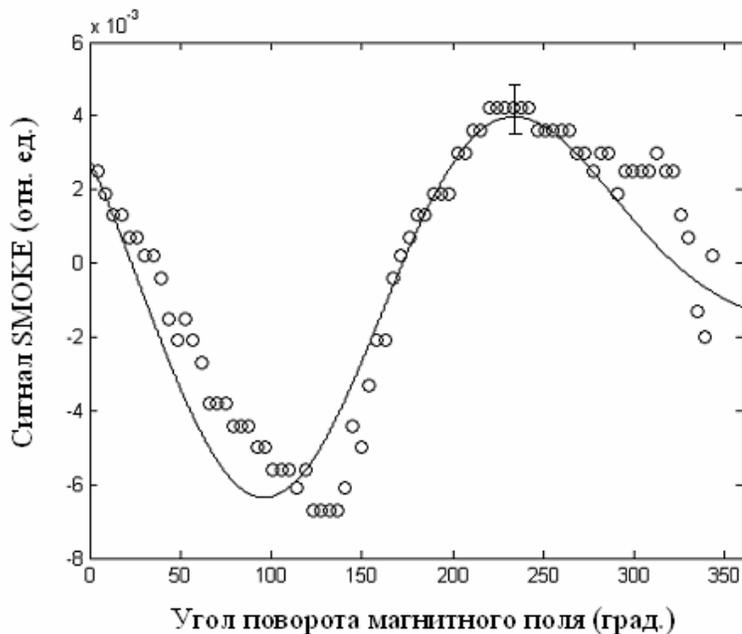


Рис. 5. Эффект Керра в двухслойной структуре Ni[8nm]/DyNi[5nm]

Прежде всего, обращает на себя внимание изменение знака эффекта, которое соответствует противоположному знаку меридионального эффекта Керра в Dy, по сравнению со знаком этого эффекта в Ni [8]. Таким образом, можно утверждать, что основная часть сигнала связана именно со сплавом DyNi и, следовательно, в этом слое возникает магнитный порядок при  $T=300$  К. В данной геометрии эксперимента магнитный момент пленки поворачивается вслед за поворотом магнитного поля. Сдвиг по фазе этих двух величин позволяет судить о магнитной анизотропии пленки.

В четвертой главе рассматривается реализация программно-аппаратного комплекса для управления процессом роста и исследования наноструктур в сверхвысоком вакууме. Для получения высококачественных наноструктур необходимо осуществлять контроль их параметров непосредственно в высоковакуумной камере в процессе роста. Одним из самых критичных параметров является толщина и связанная с ней скорость роста. В Главе 2 мы рассмотрели методику исследования структур  $(\text{Fe/Si})_n$ . Эти результаты были использованы при создании программно-аппаратного комплекса, описанного в настоящей главе. Данный комплекс, с одной стороны, позволяет с высокой точностью реализовать нагрев испарителей по заданному закону, с другой стороны дает возможность контролировать толщину, скорость роста и получать структуры с заданными свойствами благодаря эллипсометрическому контролю. Алгоритмы основаны на решении обратной задачи эллипсометрии в реальном времени с использованием лазерного эллипсометра ЛЭФ-757. Программа анализирует эволюцию эллипсометрических углов  $\psi$  и  $\Delta$ , вычисляет оптические парамет-

ры структуры, скорость роста, толщину пленки и передает управляющие команды в блок управления испарителями.

Блок управления испарителями предназначен для измерения и передачи в компьютер значений температуры испарителей камеры, выработки сигнала управления источниками питания испарителей согласно заданному закону регулирования, а также для управления заслонками испарителей. Она реализована на базе микроконтроллера фирмы Atmel AT89S8252, с архитектурой и системой команд процессоров семейства MCS-51 фирмы Intel.

**Управление напылением.** Задача системы управления напылением - открыть заслонку испарителя, нагретого до нужной температуры, на определенное время, которое соответствует необходимой толщине получаемой структуры. Предусмотрено открытие нескольких заслонок испарителей одновременно или последовательно друг за другом. Существует три режима работы напылительной системы:

- автоматический режим
- полуавтоматический режим
- ручное управление

В автоматическом режиме задается требуемая толщина и программа напыляет пленку с поддержанием постоянной скорости роста. Возможно напыление многослойной структуры из двух компонентов, в этом случае пользователь задает требуемое количество слоев и их толщины. Взаимодействие основных модулей комплекса в автоматическом режиме показано на рис. 7. Интерпретация  $\Psi$  и  $\Delta$  в реальном времени основана на результатах эллипсометрических исследований, описанных в Гл. 2, а также численному решению обратной задачи эллипсометрии методом Нелдера-Мида.



При получении многослойных структур запускается алгоритм рационального прогрева испарителей. Он заключается в последовательном запуске испарителей, с целью предотвратить бесполезное распыление материала на заслонку во время напыления слоя из другого молекулярного источника. Рассмотрим напыление

двухслойной структуры

двухслойной структуры

Рис. 7. Взаимодействие основных модулей комплекса в автоматическом режиме

(рис. 8). В начальный момент времени запускается испаритель №1. Нагрев происходит автоматически согласно выражению:

$$T(t) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{t_0 - t}{\kappa}\right)}, \quad (2)$$

где  $T(t)$  – заданная температура,  $t$  – время,  $t_0, \kappa$  – эмпирические коэффициенты.

В момент времени  $t_1$  испаритель достигает температуры испарения. Далее через интервал  $\Delta t = t_2 - t_1$  открывается заслонка 1 испарителя. Задача программы заключается в запуске испарителя №2 так, чтобы он к моменту окончания напыления первого слоя  $t_3$  достиг температуры испарения. Затем, температура испарителя понижается на время  $\Delta t = t_5 - t_3$  и выводится на режим в случае напыления следующего слоя, и т.д.

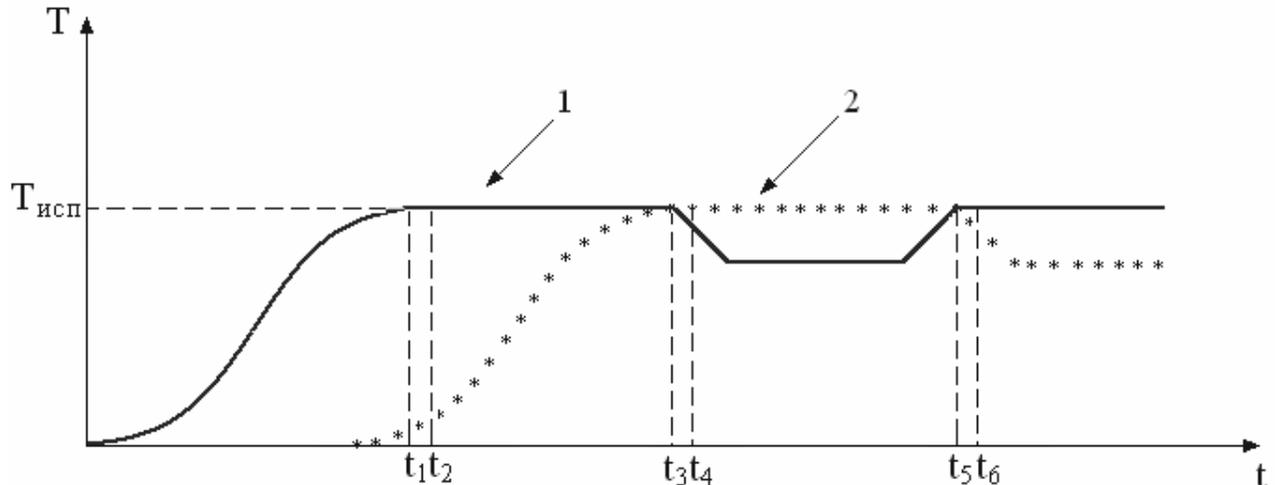


Рис. 8. Алгоритм управления испарителями для двухслойной структуры. Цифрами 1 и 2 обозначены графики температуры для 1 и 2 испарителя соответственно

В *полуавтоматическом* режиме производится контроль заслонок по времени напыления. Для этого оператор с помощью редактора составляет требуемую программу напыления, в которой задается последовательность открытия заслонок, время испарения для каждой заслонки и интервал между открытиями. Также как и с нагревом, существует возможность сохранения программы на жестком диске компьютера с целью последующего использования.

В *ручном режиме* пользователь непосредственно без составления программы нагрева задает нужную температуру и скорость ее изменения. Далее испаритель будет нагрет с указанными параметрами. Также можно открывать и закрывать заслонки нажатием на соответствующие кнопки. Часто требуется не только нагревать испарители, но и охлаждать их с заданной скоростью до нужной температуры. Такая возможность также имеется в данном комплексе.

В заключении перечислены основные полученные результаты

В приложении приведены принципиальные схемы разработанных блоков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. На базе лазерного эллипсометра ЛЭФ-757 создана новая установка, позволяющая кроме традиционных эллипсометрических углов  $\psi$  и  $\Delta$  также измерять *in situ* поверхностный магнитооптический эффект Керра. Таким образом, реализована возможность полной оптической и магнитооптической характеристики образца непосредственно в вакуумной камере в процессе напыления.
2. Разработан новый блок управления нагревом в установке молекулярно – лучевой эпитаксии «Ангара», позволяющий проводить нагрев испарителей, а также подложек по заданному закону и поддерживать температуру на заданном уровне.
3. Разработано оригинальное программное обеспечение, позволяющее управлять процессом роста наноструктур в установке молекулярно-лучевой эпитаксии. Алгоритмы основаны на решении обратной задачи эллипсометрии в реальном времени. Программа анализирует эволюцию эллипсометрических углов  $\psi$  и  $\Delta$ , вычисляет оптические параметры структуры, скорость роста и передает управляющие команды в блок управления испарителями.
4. Предложена новая эллипсометрическая методика исследования наноструктур  $(\text{Fe/Si})_n$ . Впервые осуществлено *in situ* измерение толщин слоев Fe и Si при росте наноструктур Fe/Si. Выявлен островковый рост Fe и Si на подложке Si и определен радиус островка
5. В качестве апробации нового комплекса методом термического испарения в вакууме были получены наноструктуры  $(\text{Fe/Si})_n$  с  $n=1\div 5$ , однослойные пленки Fe, Ni, Dy с толщинами  $0,5\div 50$  nm, а также пленки сплава  $\text{Dy}_{(1-x)}\text{Ni}_x$ . Показано, что при толщине Fe 0,5 nm, что соответствует двум атомным слоям, имеется ферромагнитное упорядочение при  $T=300$  К. Пленки  $\text{Dy}_{(1-x)}\text{Ni}_x$  впервые исследованы непосредственно в сверхвысоковакуумной камере в процессе напыления с помощью поверхностного меридионального эффекта Керра. Было показано возникновение ферромагнитного упорядочения в пленках  $\text{Dy}_{(1-x)}\text{Ni}_x/\text{Ni}$  при  $x > 0.05$ , при комнатной температуре.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Косырев Н.Н., Овчинников С.Г. Ферромагнетизм при комнатной температуре в двухслойной структуре  $\text{Dy}_{(1-x)}\text{Ni}_x/\text{Ni}$  : магнитооптические измерения *in situ* // Письма в ЖЭТФ. – 2008. – Т. 88. – №2. – С. 152-154.
2. Варнаков С.Н., Комогорцев С.В., Bartolome J., Sese S., Овчинников С.Г., Паршин А.С., Косырев Н.Н. Изменение намагниченности мультислойных наноструктур Fe/Si в процессе синтеза и постростового нагрева // ФММ. – 2008. – Т. 106. – № 1. – С. 54-58

3. Edelman I., Ovchinnikov S., Markov V., Kosyrev N., Seredkin V., Khudjakov A., Bondarenko G., Kesler V. Room-temperature ferromagnetism in Dy films doped with Ni // *Physica B*. – 2008. – V. 403. – №18. – P. 3295-3301.
4. Варнаков С.Н., Косырев Н.Н., Неворал П. Автоматизация технологического оборудования для получения многослойных наноструктур в сверхвысоком вакууме // Материалы докладов всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск, 2003. – Часть 6. – С. 153-154.
5. Варнаков С.Н., Косырев Н.Н. Система управления испарителями в установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Ангара» // Сборник тезисов десятой всероссийской научной конфер. студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-10». – Москва, 2004. – С. 1036.
6. Варнаков С.Н., Косырев Н.Н. Получение однослойных и многослойных пленочных структур *Fe* и *Si* в сверхвысоком вакууме // Тез. докл. VII Всерос. науч. конф. «Решетневские чтения». – Красноярск, 2003. – С 114-115.
7. Косырев Н.Н., Варнаков С.Н., Овчинников С.Г. Применение *in-situ* эллипсометрии для контроля технологического процесса получения тонких пленок *Fe* // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение». – Красноярск, 2003. – С. 231-232
8. Косырев Н.Н., Варнаков С.Н. Метод эллипсометрии в технологии получения тонких пленок *Fe* и *Si* // Сборник тезисов девятой всероссийской научной конфер. студентов-физиков и молодых ученых. «ВНКСФ-9». – Красноярск, 2003. – С. 590-591.
9. Варнаков С.Н., Косырев Н.Н. Исследование процесса роста тонких слоев кремния *in situ* методом эллипсометрии // Труды межвузовской научной конференция «Молодежь и наука – третье тысячелетие». – Красноярск, 2003. – С. 317.
10. Косырев Н.Н., Варнаков С.Н. Исследование тонких пленок *Fe* методом эллипсометрии // Сборник тезисов десятой всероссийской научной конфер. Студентов-Физиков и молодых ученых «ВНКСФ-10». – Москва, 2004. – С. 191-192
11. Варнаков С.Н., Косырев Н.Н., Овчинников С.Г. Определение толщины пленок *Fe* методом эллипсометрии в процессе роста на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Ангара» // Сборник трудов XIX международ. школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». М.: МГУ, 2004. – ГЮ-21.
12. Ovchinnikov S.G., Varnakov S.N., Kosyrev N.N. In situ ellipsometry for monitoring growth of three layer Fe/Si/Fe structure // Euro-Asian symposium “Trends in magnetism”. – Krasnoyarsk, 2004. – P. 303

13. Косырев Н.Н., Варнаков С.Н., Овчинников С.Г., Худяков А.Е. Автоматизированная система управления испарителями в установке молекулярно-лучевой эпитаксии // Материалы всероссийского совещания «Кремний - 2006». – Красноярск, 2006. – С. 112
14. Kosyrev N.N., Kolechin V.A., Zabluda V.N., Hudyakov A.E., Edelman I.S. and Ovchinnikov S.G. In situ SMOKE Measurements in ultrahigh vacuum by ellipsometry // Euro-Asian symposium “Magnetism on a nanoscale”. – Kazan, 2007. – P. 264
15. Косырев Н.Н., Овчинников С.Г., Худяков А.Е., Бондаренко Г.В. Исследование in situ ферромагнетизма при комнатной температуре в магнитных нанослоях // Материалы всероссийского симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника-2008». – Нижний Новгород, 2008.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Aspnes D.E., J.B. Theeten, F. Hottier. Investigation of effective-medium models of microscopic surface roughness by spectroscopic ellipsometry // Phys. Rev. B. – 1979. – V. 20. – № 8. – P. 3292-3305.
2. Варнаков С.Н., Паршин А.С., Овчинников и др. Структурные и магнитные характеристики однослойных и многослойных пленок Fe/Si, полученных термическим испарением в сверхвысоком вакууме // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – №22. – С. 1-8.
3. Варнаков С.Н., Bartolomé J., Sesé J. и др. Размерные эффекты и намагниченность многослойных пленочных наноструктур (Fe/Si)<sub>n</sub> // ФТТ. – 2007. – Т. 49. – №. 8. – С.1401-1405.
4. Ржанов А.В., Свиташев К.К. Основы эллипсометрии. – Новосибирск: Наука, 1979. – 423 с.
5. Елисеева Е. Г., Кононов В. П., Попел и др. Модернизация установки молекулярно-лучевой эпитаксии "Ангара" для получения пленок и структур магнитных материалов // ПТЭ. – 1997. – Т. 40. – № 2. – С. 278-280.
6. Швец В.А., Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В. Анализ статической схемы эллипсометрических измерений // Оптика и спектроскопия. – 2004. – Т. 97. – №3. – С. 514-525.
7. Пат. 2302623 Российская Федерация, Эллипсометр / Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В., Швец В.А.; опубл. 10.07.2007, Бюл. № 19.
8. Овчинников С.Г., Эдельман И.С., Марков В.В., Середкин В.А. Механизм магнитного упорядочения в двухслойных пленках Dy<sub>(1-x)</sub>Ni<sub>x</sub>/Ni // ФТТ. – 2007. – Т. 49. – №5. – С.854-858.



КОСЫРЕВ  
Николай  
Николаевич

МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЙ  
КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ  
НАНОСТРУКТУР В УСТАНОВКЕ МОЛЕКУЛЯРНО-  
ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата  
физико-математических наук

Подписано в печать 20.10.08  
Формат 60x84/16. Усл. печ. л.1. Тираж 70. Заказ № 26.  
Отпечатано в типографии Института физики СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН