

На правах рукописи



**Шевцов Дмитрий Валентинович**

**РАЗРАБОТКА СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ  
ПОЛУЧЕНИЯ И *IN SITU* ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР  
МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ  
ЭЛЛИПСОМЕТРИИ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в Лаборатории физики магнитных явлений Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФ СО РАН)

**Научный руководитель:** **Варнаков Сергей Николаевич**, д. ф.-м. н., доцент, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики имени Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН

**Официальные оппоненты:** **Пронин Игорь Иванович**, д. ф.-м. н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией Физики элементарных структур на поверхности Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург

**Семёнов Валентин Георгиевич**, д. ф.-м. н., профессор, заместитель заведующего кафедрой аналитической химии Института химии Санкт-Петербургского Государственного Университета, г. Санкт-Петербург

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), лаборатория плазменной эмиссионной электроники, г. Томск

#### **Защита состоится**

« 25 » октября 2019 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 002.034.01 на базе Института аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН) по адресу: 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 31–33 лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ИАП РАН по тому же адресу и на сайте [www.iaigas.ru](http://www.iaigas.ru). Отзывы на диссертацию и автореферат направлять по адресу: 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., д. 26, Институт аналитического приборостроения РАН, а/я 207.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Буляница А.Л.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Современные тенденции развития физики и технологии полупроводниковой индустрии в микро- и наноэлектронике, проявляющиеся в переходе топологии функциональных элементов от микроразмеров к нанометровой геометрии, требуют создания нового типа кластерного оборудования для синтеза и исследования свойств и процессов в искусственно создаваемых наноструктурах, а также усовершенствования существующих методов комплексной диагностики получаемых наноструктур [1]. В таких кластерных системах предъявляют повышенные требования как к средствам синтеза, так и к аналитическим средствам контроля параметров наноструктур непосредственно в процессе их подготовки и производства, то есть в так называемых условиях *in situ*.

В современном мире цифровых технологий с переходом к наноэлектронике становится актуальной задача реализации всех возможных процедур – начиная от процесса загрузки подложки и заканчивая получением готового кристалла в едином нанотехнологическом комплексе, снабжённом средствами обработки, синтеза и исследования структур на нанометровом уровне [2]. По мнению большинства экспертов, междисциплинарные технологии, оперирующие объектами с нанометровыми линейными размерами, будут иметь революционное значение в ближайшем будущем [3]. В связи с этим для проведения исследований в области низкоразмерных структур незаменимым инструментом является сверхвысоковакуумный комплекс, ориентированный на исследование и модификацию объектов в нанометровом масштабе, используемый для создания упорядоченных гомо- и гетероструктур с атомарной точностью, а также устройств на их основе [4].

В последние годы серьёзный интерес в физике представляет такое новое направление квантовой электроники, как спинтроника, основанное на спин-поляризованном электронном транспорте [5]. Посредством различных технологий исследователи пытаются создавать для спинтроники новые разнообразные наноструктуры с необходимыми магнитными свойствами. Одними из таких новых материалов являются слоистые структуры «ферромагнитный металл/полупроводник», где в качестве металла могут использоваться Fe, Co, Ni, Mn, а в качестве полупроводниковых слоёв – Si, Ge. В данных структурах важно уделять внимание формированию, составу и свойствам межслоевых интерфейсов. Однако интерес представляют не только свойства конечной структуры, но и возможность диагностики материалов в процессе их создания, которая позволила бы получать структуры с желаемыми характеристиками, синтезировать наноматериалы с управляемыми на атомном и субатомном уровне составом, структурой и свойствами. Для подобной диагностики хорошо зарекомендовал себя неразрушающий *in situ* метод анализа поверхности – отражательная спектральная эллипсометрия [6]. Кроме того, данная поляризационная оптическая методика позволяет производить и

магнитооптический анализ тонких плёнок при помещении ферромагнитного образца во внешнее магнитное поле.

Также хорошо известно, что информацию о квантовых состояниях поверхности, в том числе и ферромагнетика, можно получить при проведении измерений при низких температурах образца. Таким образом, актуальным является вопрос о создании *in situ* спектральных магнитоэллипсометрических систем с возможностью задания температуры образца в широком диапазоне.

Учитывая доминирующие позиции кремниевых технологий в современной микроэлектронике, создание ферромагнитных материалов на основе силицидов, производство которых потребует минимальных изменений существующих технологических процессов, для микроэлектронной промышленности является логически оправданным. А в роли диэлектрического слоя может, как и прежде, широко использоваться диоксид кремния. Ранее уже были показаны [7] потенциальные возможности спектральной магнитоэллипсометрии для определения оптических и магнитооптических свойств тонких плёнок Fe, осаждённых на окисленную поверхность монокристаллического кремния.

В связи с этим является актуальным развитие исследовательской аппаратуры, позволяющей в едином технологическом цикле синтезировать и *in situ* получать информацию о морфологии поверхности образца, его спектральных оптических и магнитооптических параметрах.

**Целью диссертационной работы** является разработка сверхвысоковакуумного комплекса, позволяющего в едином технологическом цикле проводить синтез и *in situ* исследование наноструктур методом спектральной магнитооптической эллипсометрии в широком температурном диапазоне.

### **Научная новизна**

1. Реализовано оригинальное конструктивное решение сверхвысоковакуумной ростовой камеры, особенностью которого является взаимное расположение систем эллипсометрических измерений, подведения внешнего магнитного поля и системы нагрева и охлаждения образца в едином исполнении, которое позволило в рамках одного эксперимента совместить не только возможность проведение *in situ* исследований оптических и магнитных свойств, сформированных наноструктур в широком диапазоне температур, но и задавать начальные условия формирования этих структур, таких как начальную температуру и величину магнитного поля в области образца в диапазоне 85–900 К и –6 до +6 кЭ соответственно.

2. С помощью разработанного сверхвысоковакуумного комплекса, позволяющего исключить влияние атмосферы на получаемые структуры, обеспечена возможность проведения *in situ* магнитооптических измерений и получения новых фундаментальных знаний, таких как, начало формирования магнитного состояния, температуры движения доменных стенок, определение условий смены типа роста при молекулярно-лучевой эпитаксии.

### **Практическая значимость работы**

1. Изготовленный напылительный сверхвысоковакуумный комплекс может быть применен в технологических процессах получения изделий нанoeлектроники, требующих сверхвысокого вакуума (порядка  $10^{-8}$  Па) и температурных режимов (от 85 К до 900 К).

2. Разработанная конструкция манипулятора-держателя и исследовательская методика дают возможность получения наноструктур с металлическими, полупроводниковыми и диэлектрическими слоями, совмещёнными на одной подложке монокристалла кремния, для развития технологии изготовления устройств спинтроники на кремниевой основе.

Исследования по тематике диссертационной работы были поддержаны в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 годы», государственный контракт № 14.513.11.0016 от 11 марта 2013 г., и в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», соглашение № 14.604.21.0002 о предоставлении субсидии от 17 июня 2014 г.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Реализованное конструктивное решение сверхвысоковакуумного технологического комплекса позволяет синтезировать наноразмерные структуры (толщиной 1–100 нм) с возможностью проведения *in situ* одноволновых и спектральных (300–900 нм) эллипсометрических исследований.

2. Созданная магнитная система позволяет в автоматическом режиме проводить *in situ* магнитоэллипсометрические исследования с развёрткой по внешнему магнитному полю от –6 до +6 кЭ.

3. Созданная система манипулятора-держателя позволяет проводить *in situ* магнитоэллипсометрические исследования в температурном диапазоне 85–900 К.

4. Последовательность технологических операций, включающих в себя одновременное использование спектральной эллипсометрии, внешнего магнитного поля и поддержания заданной температуры позволяет проводить неразрушающую *in situ* магнитоэллипсометрическую диагностику наноразмерных структур в температурном диапазоне 85–900 К.

### **Апробация результатов работы**

Результаты, включённые в диссертацию, были представлены и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

V Ставеровских чтениях «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы» 15-16 октября 2009 г. Красноярск; IV Байкальской Международной конференции «Магнитные материалы. Новые технологии» (ВМСММ-2010), г. Иркутск-2010; XIV Международной научной конференции, посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика

М.Ф. Решетнёва (10–12 ноября 2010, г. Красноярск); II-й Всероссийской научной конференции «Методы исследования состава и структуры функциональных материалов», МИССФМ-2 (г. Новосибирск, Россия, 21–25 октября 2013 г.); VI Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2016), August 15-19, 2016, Krasnoyarsk, Russia; 26th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» 18–22 июня 2018, г. Минск, Беларусь.

В целом работа докладывалась на научных семинарах лаборатории физики магнитных явлений, отдела физики магнитных явлений Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (Красноярск, 2019 г.).

### **Публикации**

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 9 статьях. Из них в перечень ВАК РФ входят 4 статьи, опубликованные в рецензируемых журналах и индексируемых системой цитирования Web of Science. Кроме того, 9 тезисов в сборниках трудов всероссийских и международных конференций и симпозиумов, 2 патента РФ, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка использованной литературы. Общий объём диссертации составляет 131 страниц, включая 45 рисунков и список литературы из 142 наименования.

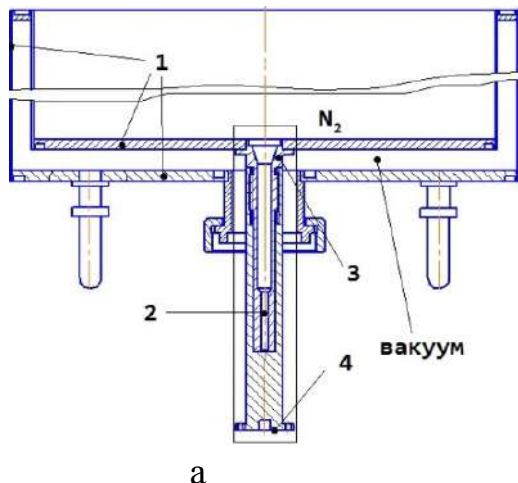
### **Основное содержание работы**

**Во введении** сформулированы актуальность, цель работы, научная новизна и практическая значимость результатов, а также приведены основные положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

**Первая глава** посвящена обзору литературных данных по технологии синтеза с использованием основных вакуумных методов, а также возможностей их применения для получения тонких плёнок и наноструктур. Сделан краткий обзор метода отражательной спектральной магнитоэллипсометрии для исследования оптических и магнитооптических свойств тонких плёнок и наноструктур, основанного на анализе изменения состояния поляризации при отражении зондирующего пучка. Рассмотрены вопросы, связанные с экспериментальными измерениями магнитооптического эффекта Керра. Показаны потенциальные возможности спектральной эллипсометрии для анализа магнитооптических данных при проведении температурных исследований. Более подробно рассмотрены имеющиеся отечественные и зарубежные технологические решения для проведения температурных эллипсометрических и магнитооптических исследований и отражена актуальность их практического применения. В конце первой главы формулируются задачи настоящего исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке тестовых систем нагрева и охлаждения образца в температурном диапазоне 85–900 К. На основе анализа существующих решений и проведённых патентных исследований были разработаны и созданы тестовые системы охлаждения и нагрева (рисунок 1).

### Прототип системы охлаждения



### Прототип системы нагрева

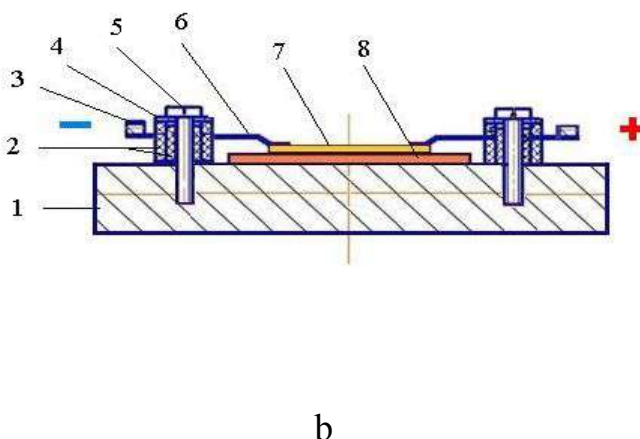


Рисунок 1 – Прототипы системы нагрева и охлаждения

Было установлено, что наиболее эффективной системой охлаждения является теплопроводящий медный стержень с закреплённым образцом с одной его стороны и хладагентом с другой (рисунок 1а). Система охлаждения состоит из: сосуда Дьюара из нержавеющей стали – 1; медного держателя образца – 2; медной пластины охлаждаемой азотом – 3; крепления образцов – 4. Испытания созданной конструкции показали высокую скорость охлаждения образца и стабильность при поддержании постоянной температуры его поверхности в диапазоне от 85 до 300 К, а также возможность нагрева до 470 К парами нагретого азота (рисунок 2).

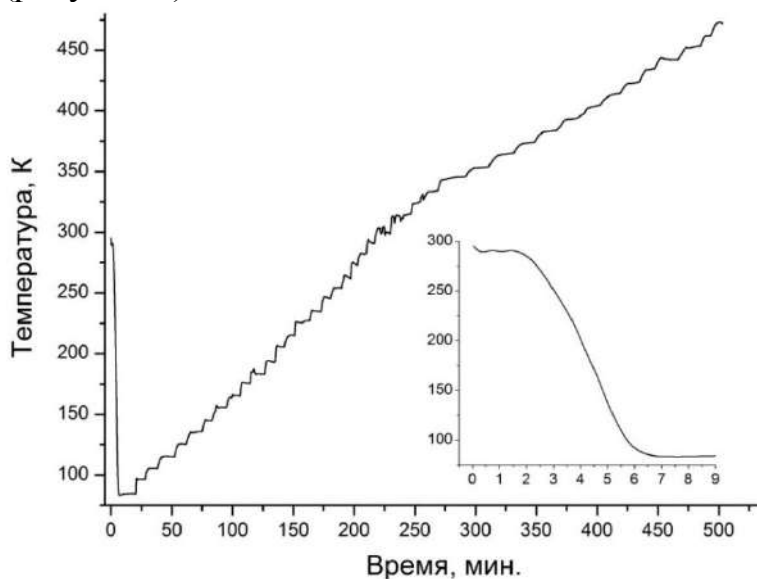


Рисунок 2 – Зависимость температуры образца от времени.  
На вставке – процесс начального охлаждения

Испытания конструкции показали среднее время охлаждения образца от комнатной температуры до температуры кипения азота менее 15 минут. Такая система позволяет не только охлаждать образец до температуры кипения азота, но и поддерживать в течение длительного времени любые промежуточные значения температуры образца в диапазоне от 85 до 470 К методом косвенного нагрева держателя, тем самым реализуя механизм термостабилизации.

Для изготовления системы нагрева сначала был изготовлен её прототип (рисунок 1b), где: 1 – медный держатель; 2 – втулки; 3 – контакт; 4 – шайба; 5 – винт; 6 – прижимные контакты; 7 – кремниевая подложка; 8 – диэлектрическая пластина, и проведено его успешное предварительное тестирование. В последующем на основе медного держателя, используемого в системе охлаждения, была разработана система нагрева образца методом прямого пропускания тока (рисунок 3). При этом ключевым элементом конструкции системы нагрева является диэлектрическая пластина из сапфира между образцом и медным держателем. Сапфир обладает быстроспадающей зависимостью коэффициента теплопроводности при повышении температуры от 80 до 1300 К, что позволяет применять его в роли теплоизолятора при высоких температурах и эффективного теплоотвода при температурах кипения азота.

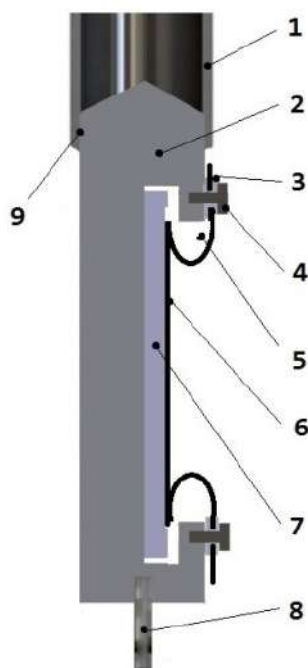


Рисунок 3 – Модель держателя образца в разрезе с элементами для нагрева и охлаждения. Цифрами обозначены: 1 – стальная трубка с хладагентом; 2 – сплошной медный держатель образца; 3 – электроизоляция тоководов; 4 – крепёжные винты; 5 – танталовые тоководы в форме прижимных лапок; 6 – образец (пластина кремния); 7 – пластина сапфира; 8 – фиксатор; 9 – соединение сваркой



Моделирование процессов нагрева для разработанной тестовой конструкции держателя (рисунок 4) показало высокую равномерность нагрева поверхности образца.

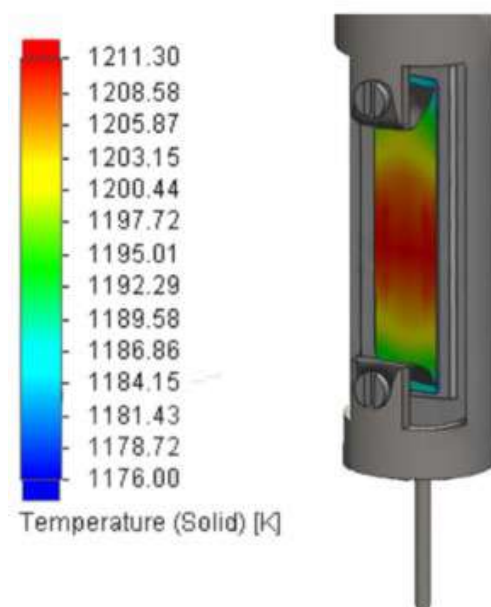


Рисунок 4 – Распределение температуры на подложке при 1200 К

Рассчитанный средний градиент температуры вдоль образца составил не более 1.3 градусов на 1 мм при 1200 К, что является показателем достаточно равномерного нагрева для сохранения однородной морфологии поверхности кремниевого образца.

**Третья глава** посвящена оптимизации компоновки основных систем разрабатываемой вакуумной установки, а также проектированию и изготовлению манипулятора-держателя, обеспечивающего в условиях сверхвысокого вакуума шлюзовую загрузку исследуемых наноструктур и позволяющего проводить эллипсометрическую диагностику в широком диапазоне температур.

Технологический комплекс был оснащён следующими разработанными и изготовленными системами: напылительной системой, вакуумной откачной системой, системой крепления спектрального магнитоэллипсометра и магнитной системой. Для проведения *in situ* исследований методом спектральной магнитоэллипсометрии в температурном диапазоне 85–900 К был создан специальный манипулятор-держатель образца [8] (рисунок 5), состоящий из следующих систем: системы шлюзовой загрузки образца, системы вакуумного затвора, транспортной вакуумной системы для установки и юстировки образца при эллипсометрической диагностике, системы подачи жидкого азота (обеспечивающую температурный диапазон измерений 85–300 К) и системы нагрева образца (обеспечивающую температурный диапазон измерений 300–900 К).

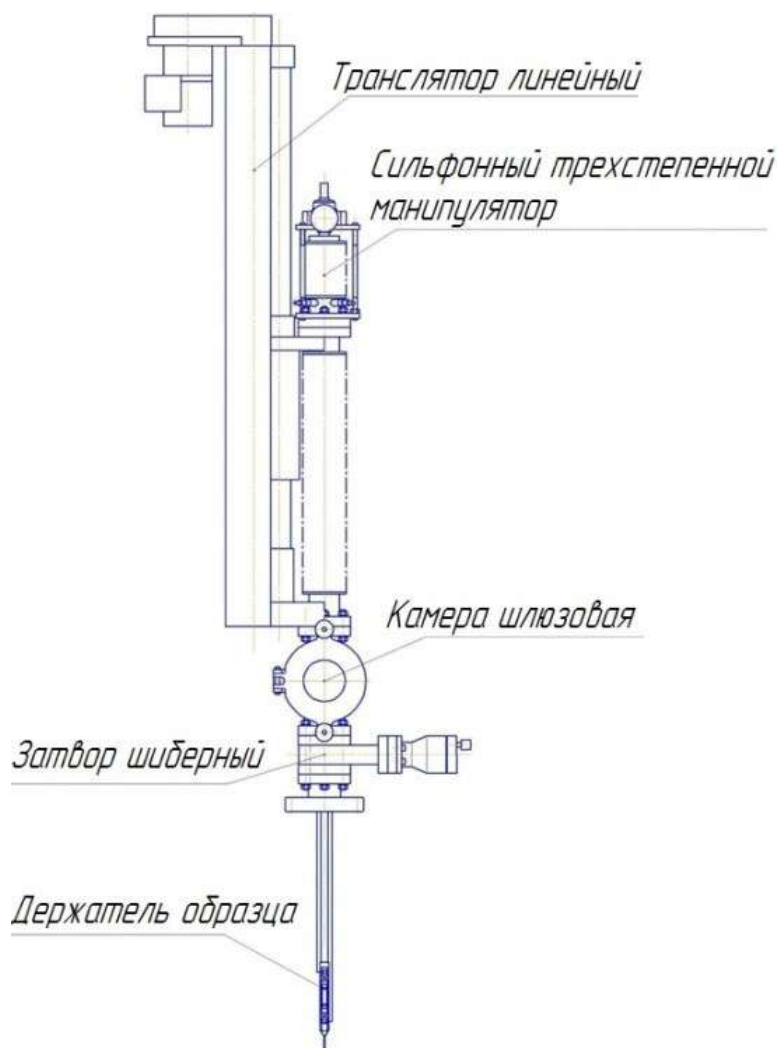


Рисунок 5 – Общий вид манипулятора-держателя

При проведении тестирования и оценки общей работоспособности спроектированных и созданных систем технолого-аналитического комплекса с манипулятором-держателем, во-первых, была проведена оценка работоспособности напылительной системы. В результате была синтезирована структура системы  $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$  методом термического испарения в сверхвысоком вакууме. Методами одноволновой и спектральной эллипсометрии были измерены значения эллипсометрических параметров в процессе роста структуры (рисунок 6) и рассчитана зависимость толщины плёнки от времени напыления. Согласно проведённой оценке толщина  $\text{SiO}_2$  составила  $0.4 \pm 0.1$  нм, а эффективная толщина плёнки железа –  $12.4 \pm 0.1$  нм (одноволновые измерения),  $12.5 \pm 0.4$  нм (спектральные измерения). Также толщина плёнки Fe, была измерена с помощью метода рентгеноспектрального флуоресцентного анализа, и составила  $12.4 \pm 0.6$  нм. Таким образом, был сделан вывод о том, что, с учётом погрешности измерений методами рентгеноспектрального флуоресцентного анализа, спектральной и

одноволновой эллипсометрии, значения толщин Fe в пределах погрешности совпадают.

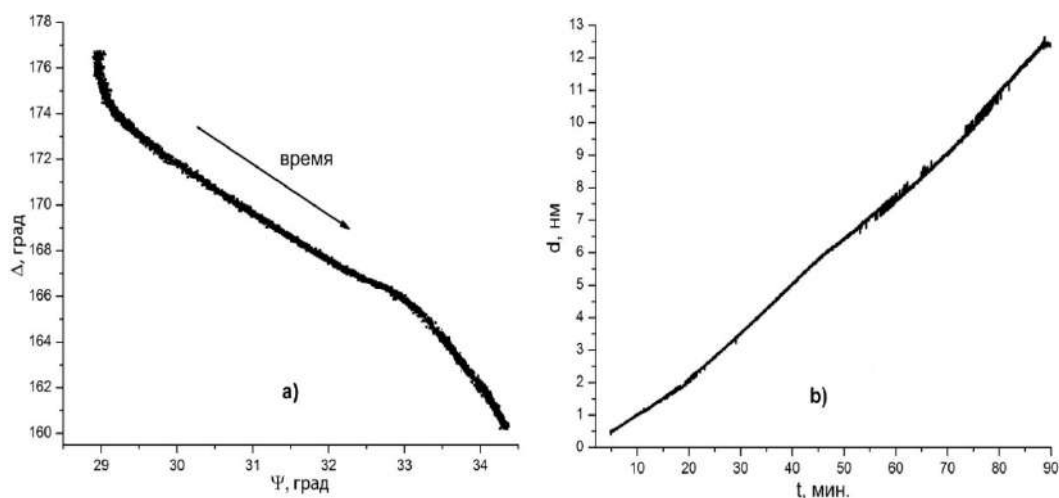


Рисунок 6 – а) номограмма изменения эллипсометрических углов по данным одноволновой эллипсометрии; б) рассчитанная зависимость толщины плёнки железа от времени по данным одноволновой эллипсометрии

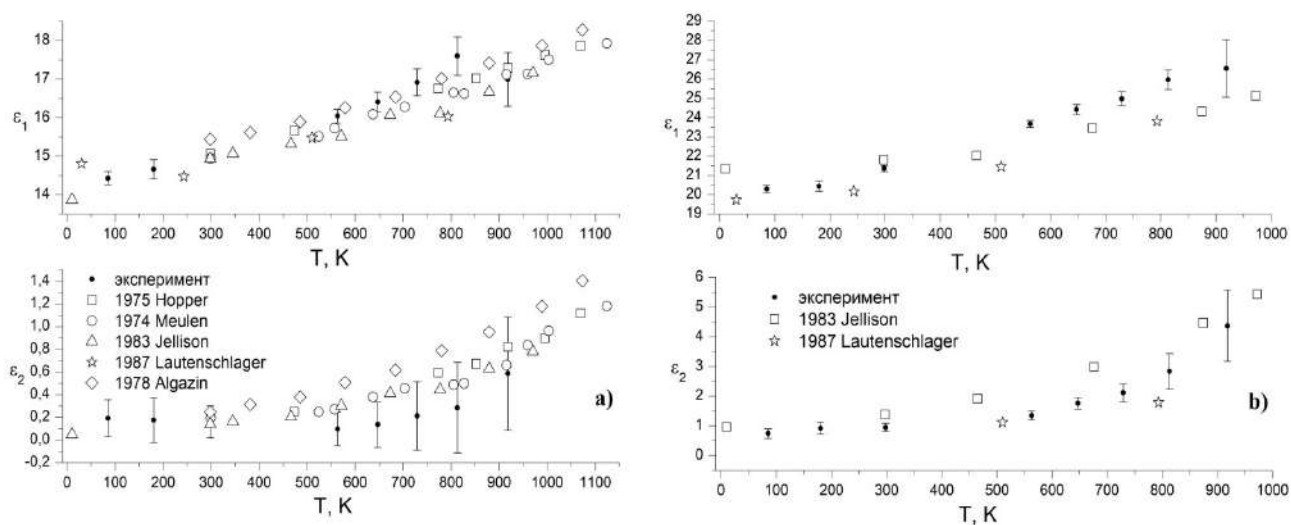


Рисунок 7 – а) температурные зависимости рассчитанных по результатам эллипсометрических измерений  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  для Si на длине волны 632.8 нм (1.96 эВ); б) Температурные зависимости рассчитанных по результатам эллипсометрических измерений  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  для Si на длине волны 459.3 нм (2.70 эВ)

При тестировании системы нагрева и охлаждения подложки, которое проводилась путём измерения температурной зависимости спектрограммы комплексной диэлектрической проницаемости монокристаллического кремния  $\epsilon = \epsilon_1 + i \cdot \epsilon_2$  (рисунок 7), были получены значения  $\epsilon$  для кремния которые согласуются с данными для кремния у других авторов [9, 10, 11, 12, 13] в

широком спектральном диапазоне, что подтвердило работоспособность системы задания и контроля температуры образца.

Также на примере структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) была отработана методика *in situ* исследований магнитных свойств образца. Проведены *in situ* исследования магнитных свойств плёнки Fe методами спектральной магнитоэллипсометрии в конфигурации экваториального эффекта Керра. Определена величина коэрцитивной силы  $120 \pm 6$  Э и поля насыщения образца порядка  $H_s = \sim 300$  Э (рисунок 8). Полученные значения близки к значениям для аналогичных структур Fe, известных из литературных данных [14, 15, 16, 17].

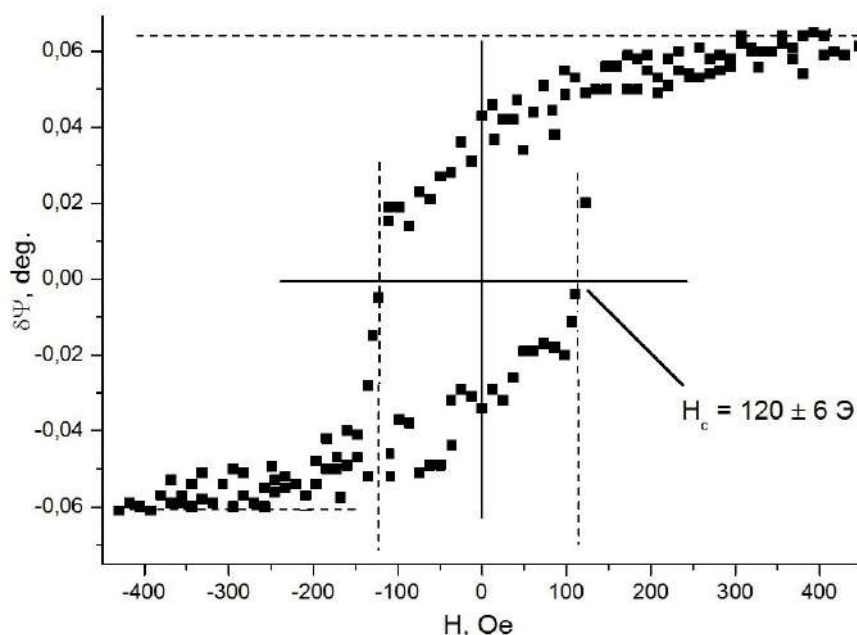


Рисунок 8 – Зависимость эллипсометрического параметра  $\Psi$  от величины магнитного поля для структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) на длине волны 470 нм при *in situ* измерениях экваториального магнитооптического эффекта Керра

Таким образом, был создан уникальный технолого-аналитический комплекс, объединяющей в себе метод синтеза наноматериалов, методы спектрального эллипсометрического анализа и магнитооптических измерений в диапазоне температур от 85 до 900 К (рисунок 9).

В результате проверки работоспособности всех систем сверхвысоковакуумной многофункциональной установки были определены её следующие основные характеристики:

- минимальное давление в системе  $2.67 \cdot 10^{-8}$  Па;
- время достижения давления  $6.65 \cdot 10^{-7}$  Па в камере установки после замены образца с помощью шлюзового устройства не более 4 часов;
- максимальные габариты исследуемого образца – 8 мм x 26 мм x 3 мм;
- спектральный диапазон магнитоэллипсометрических измерений 350–1000 нм;

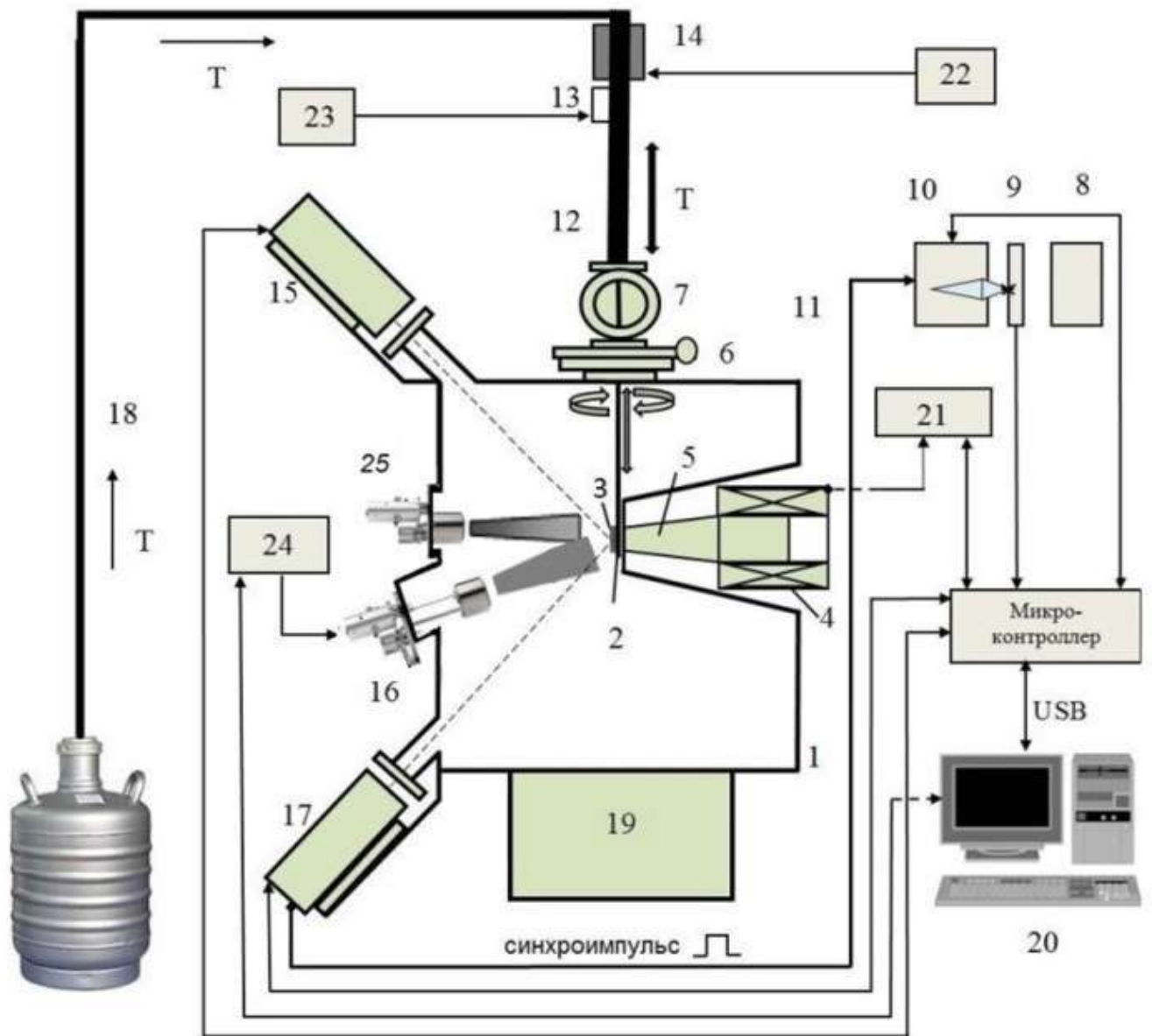


Рисунок 9 – Блок-схема сверхвысоковакуумной многофункциональной установки: 1 – вакуумная камера; 2 – шток с держателем образца; 3 – исследуемый образец; 4 – электромагнит; 5 – магнитопровод; 6 – шибберный затвор; 7 – шлюзовая камера перезагрузки; 8 – источник света; 9 – обтюратор; 10 – монохроматор; 11 – световод; 12 – линейный сильфонный транслятор; 13 – вакуумный сильфонный трёхступенной манипулятор; 14 – проточный испаритель-нагреватель; 15 – блок анализатора; 16 – молекулярный источник; 17 – блок поляризатора; 18 – система подачи азота; 19 – магниторазрядный насос; 20 – компьютер; 21 – блок питания магнита; 22 – блок питания проточного нагревателя; 23 – блок питания нагревателя образца; 24 – блок питания испарителя; 25 – испаритель

- температурный диапазон измерений 85–900 К;
- характерное время измерения эллипсометрического спектра не более 20 секунд;
- предельная пороговая чувствительность поляризационно-оптических измерений не более 0.5 угл. мин;
- максимальная величина напряжённости магнитного поля 6 кЭ;
- время установки магнитного поля в среднем составляет около 0.5 секунд.

**В четвёртой главе** на примере структуры «ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник» были продемонстрированы возможности созданного сверхвысоковакуумного комплекса: осуществлять синтез ферромагнитных наноструктур на поверхности подложки с *in situ* неразрушающим эллипсометрическим контролем и проводить *in situ* исследования полученной наноструктуры методом магнитоэллипсометрии в температурном диапазоне 85–1005 К в едином технологическом цикле.

Была синтезирована ферромагнитная наноструктура Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) методом термического испарения в сверхвысоком вакууме с неразрушающим *in situ* эллипсометрическим контролем процесса осаждения Fe на поверхность SiO<sub>2</sub>/Si(100). Процесс осаждения железа непрерывно контролировался неразрушающим *in situ* одноволновым эллипсометрическим методом, при котором производился расчёт толщины растущего слоя железа по модифицированному методу Ньютона [18]. Согласно расчёту по данным одноволновой эллипсометрии итоговая толщина Fe составила  $17.3 \pm 0.2$  нм при средней скорости осаждения 0.275 нм/мин. По результатам *in situ* спектральных эллипсометрических измерений после осаждения железа при температуре 300 К толщина плёнки железа составила  $17.6 \pm 0.4$  нм. Результаты измерений толщины Fe в пределах погрешности согласуются с данными рентгеноспектрального флуоресцентного анализа, согласно которым толщина Fe составила  $17.0 \pm 0.6$  нм.

Проведены *in situ* спектральные эллипсометрические и магнитоэллипсометрические измерения на образце Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) в диапазоне температур от 85 до 1005 К. Результаты измерений полевых зависимостей по эллипсометрическому параметру  $\Psi$  относительно среднего значения для наноструктуры Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) при различных температурах от 85 до 1005 К (рисунок 10) показывают уменьшение магнитоэллипсометрического отклика при увеличении температуры.

Зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  плёнки при нагреве также имеет спадающий характер, с пересечением нуля в точке с примерным значением  $1052 \pm 10$  К (рисунок 11). Полученный экспериментальный результат лежит очень близко к значению температуры Кюри объёмного ОЦК железа ( $T_c = 1043$  К) [19].

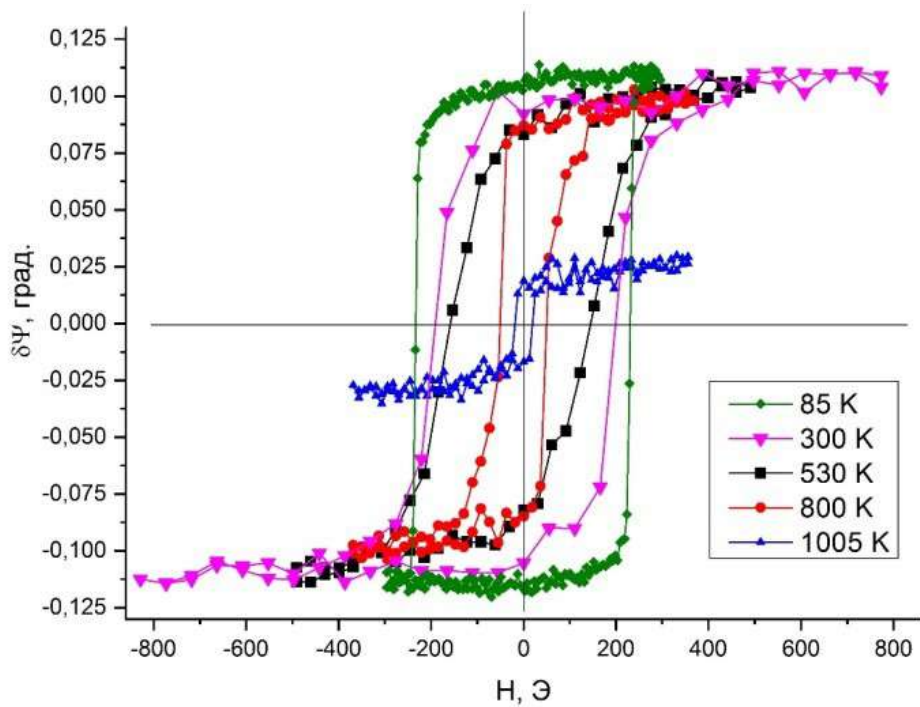


Рисунок 10 – Результаты измерений полевых зависимостей по эллипсометрическому параметру  $\Psi$  относительно среднего значения для наноструктуры Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) при различных температурах от 85 до 1005 К

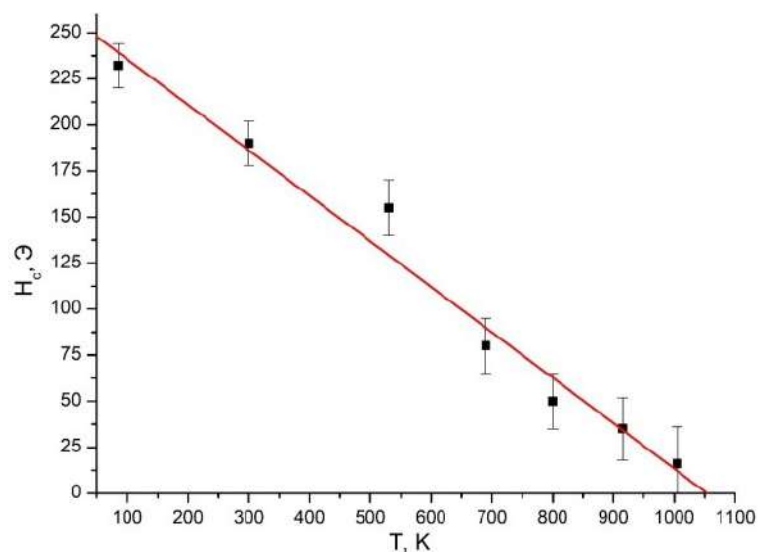


Рисунок 11 – Значения коэрцитивной силы для наноструктуры Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) при нагреве по данным магнитоэллипсометрии

В заключении к четвёртой главе было отмечено, что при нагреве структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) более 600 К её собственная светимость в инфракрасном диапазоне превышает величину засветки от источника зондирующего пучка в сотни раз, что серьёзно затрудняет спектральные эллипсометрические и магнитоэллипсометрические измерения. Данную проблему предложено решать с помощью длительного усреднения сигнала с вычитанием фоновой засветки.

**В заключении сформулированы основные результаты исследования.**

Разработанный сверхвысоковакуумный комплекс для получения и *in situ* исследования наноструктур методом спектральной магнитооптической эллипсометрии в широком температурном диапазоне может существенно продвинуть метод магнитоэллипсометрии, как метод неразрушающей *in situ* эллипсометрической диагностики в широком диапазоне температур (85–900 К).

Основными выводами работы являются:

1. Разработан и создан сверхвысоковакуумный технологический комплекс, позволяющий проводить синтез наноразмерных структур (толщиной 1–100 нм) с возможностью проведения *in situ* одноволновых и спектральных (300–900 нм) эллипсометрических исследований.
2. Внедрена магнитная система ( $H_{\text{внеш}}$  до 6 кЭ), позволяющая в автоматическом режиме проводить *in situ* магнитоэллипсометрические исследования.
3. Создана и внедрена система манипулятора-держателя, позволяющая проводить *in situ* магнитоэллипсометрические исследования в температурном диапазоне 85–900 К.
4. Предложена методика неразрушающей *in situ* магнитоэллипсометрической диагностики наноразмерных структур в температурном диапазоне 85–900 К и проведены тестовые исследования наноструктуры Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) в температурном диапазоне 85–900 К.



### Публикации автора по теме диссертации

1. Shevtsov, D.V. Ultrahigh vacuum holder-positioner for *in situ* studies of conductive nanostructures in a wide temperature range / D.V. Shevtsov, S.A. Lyaschenko, S.N. Varnakov // **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. – 2016. – Vol. 155. – Issue 1. – P. 012028.
2. Шевцов, Д.В. Сверхвысоковакуумная многофункциональная установка для синтеза низкоразмерных структур и их *in situ* исследований методом спектральной магнитоэллипсометрии в температурном диапазоне 85–900 К / Д.В. Шевцов, С.А. Лященко, С.Н. Варнаков // **Приборы и техника эксперимента**. – 2017. – № 5. – С. 146–150.
3. Рыхлицкий, С.В. Измерительно-ростовой комплекс для синтеза и исследования *in situ* материалов спинтроники / С.В. Рыхлицкий, В.А. Швец, Е.В. Спесивцев, В.Ю. Прокопьев, С.Г. Овчинников, В.Н. Заблуда, Н.Н. Косырев, С.Н. Варнаков, Д.В. Шевцов // **Приборы и техника эксперимента**. – 2012. – № 2. – С. 165.
4. Лященко, С.А. Исследования магнитооптических свойств тонких слоёв Fe *in situ* методами / С.А. Лященко, И.А. Тарасов, С.Н. Варнаков, Д.В. Шевцов, В.А. Швец, В.Н. Заблуда, С.Г. Овчинников // **Журнал технической физики**. – 2013. – Т. 83. – Вып. 10. – С. 139–142.
5. Лященко, С.А. Автоматизация магнитоэллипсометрических *in situ* измерений на сверхвысоко-вакуумном комплексе для синтеза и исследования материалов спинтроники / С.Н. Варнаков, И.А. Тарасов, Д.В. Шевцов, С.Г. Овчинников // **Вестник СибГАУ**. – 2012. – Вып. 4(44). – С. 162–167.
6. Maximova, O.A. *In situ* magneto-optical ellipsometry data analysis for films growth control / O.A. Maximova, N.N. Kosyrev, S.N. Varnakov, S.A. Lyaschenko, I.A. Yakovlev, I.A. Tarasov, D.V. Shevtsov, O.M. Maximova, S.G. Ovchinnikov // **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. – 2017. Vol. 440. – P. 196–198.
7. Maximova, O. Magneto-ellipsometry as a powerful technique for investigating magneto-optical structures properties / O. Maximova, N. Kosyrev, I. Yakovlev, D. Shevtsov, S. Lyaschenko, S. Varnakov, S. Ovchinnikov // **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. – 2017. – Vol. 440. – P. 153–156.
8. Система регистрации и анализа магнитоэллипсометрических данных (Valnadin) / С.А. Лященко, И.А. Тарасов, Н.Н. Косырев, С.Н. Варнаков, В.Н. Заблуда, С.Г. Овчинников, Д.В. Шевцов // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012618677. – Зарегистрировано 24 сентября 2012 г.
9. Автоматизированный комплекс для управления технологическими процессами получения тонких структур металла на полупроводнике, используя измерение и анализ магнитоэллипсометрических данных (Valnadin Auto) / С.А. Лященко, И.А. Тарасов, Д.В. Шевцов, С.Н. Варнаков, С.Г. Овчинников // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013617818. – Зарегистрировано 23 августа 2013 г.
10. Способ измерения магнитооптических эффектов *in situ* / Н.Н. Косырев, В.Н. Заблуда, И.А. Тарасов, С.А. Лященко, Д.В. Шевцов, С.Н. Варнаков, С.Г. Овчинников // **Изобретение** № 2560148RU от 20.08.2015 г.

11. Способ бесконтактного измерения температуры *in situ* / Н.Н. Косырев, С.А. Лященко, Д.В. Шевцов, С.Н. Варнаков, И.А. Яковлев, И.А. Тарасов, В.Н. Заблуда // **Изобретение** № 2660765RU от 09.07.2018 г.

### Список цитируемой литературы

1. Асеев, А.Л. Наноматериалы и нанотехнологии для современной полупроводниковой электроники / А.Л. Асеев // *Российские нанотехнологии*. – 2006. – Т.1. – № 1, 2. – С. 97.
2. Бобринецкий, И.И. Учебно-исследовательский нанотехнологический комплекс / И.И. Бобринецкий, М.М. Симунин, В.К. Неволин, А.А. Строганов, К.В. Горшков // *Российские нанотехнологии*. – 2008. – Т. 3. – № 3–4. – С. 173–175.
3. Быков, В.А. Междисциплинарные нанотехнологические центры – основа развития инноваций / В.А. Быков // *Наноиндустрия*. – 2010. – № 1. – С. 48–51.
4. Бобринецкий, И.И. Учебно-научный комплекс «Нанофаб онлайн» / И.И. Бобринецкий, И.Д. Бородина, В.К. Неволин, А.В. Ромашкин, К.А. Царик // *Российские нанотехнологии*. – 2012. – Т. 7. – № 5-6.
5. Жувикин, Г. Спинтроника [Электронный ресурс] / Г. Жувикин // *Компьютерра*. – 2005. – № 3. – Режим доступа: <http://old.computerra.ru/offline/2005/575/37385/>.
6. Ржанов, А.В. Основы эллипсометрии / А.В. Ржанов, К.К. Свиташев, А.И. Семененко, Л.В. Семененко, В.К. Соколов; под ред. А.В. Ржанова. – Новосибирск: Наука, 1979. – 419 с.
7. Morchenko, A.T. Magneto-Ellipsometry Investigations of Multilayer Nanofilms of Fe and Co / A.T. Morchenko, L.V. Panina, V.G. Kostishyn, N.A. Yudanov, S.P. Kurochka, A.A. Sergienko, R.D. Piliposyan, N.N. Krupa // *Journal of nano- and electronic physics*. – 2013. – Vol. 5. – № 4. – 04002(4pp).
8. Shevtsov, D.V. Ultrahigh vacuum holder-positioner for *in situ* studies of conductive nanostructures in a wide temperature range / D.V. Shevtsov, S.A. Lyaschenko, S.N. Varnakov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 155. – Issue 1. – P. 012028.
8. Lautenschlager, P. Temperature dependence of the dielectric function and inter band critical points in silicon / P. Lautenschlager, M. Garriga, L. Vina, M. Cardona // *Physical Revue: B*. – 1987. – Vol. 36. – № 9. – P. 4821–4830.
9. Y.J. van der Meulen, Y.J. Design and operation of an automated, high-temperature ellipsometer / Y.J. van der Meulen, N.C. Hien // *Journal of the optical society of America*. – 1974. – Vol. 64. – № 6. – P. 804–811.
10. Hopper, M.A. Thermal oxidation of silicon: *in situ* measurement of the growth rate using ellipsometry / M.A. Hopper, R.A. Clarke, L. Young // *Journal of the electrochemical society*. – 1975. – Vol. 122. – № 9. – P. 1216–1222.
11. Jellison, G.E., Jr. Optical functions of silicon between 1.7 and 4.7 eV at elevated temperatures / G.E. Jellison, F.A. Modine // *Physical Revue: B*. – 1983. – Vol. 27. – № 12. – P. 7466–7472.
12. Algazin, Y.B. Optical constants and temperature dependences of atomically pure surfaces of germanium and silicon / Y.B. Algazin, Y.A. Blyumkina, N.I. Grebnev,

- K.K. Svitashv, L.V. Semenenko, T.M. Yablontseva // Optics and Spectroscopy. – 1978. – Vol. 45. – P. 183–188.
13. Cebollada, F. Anisotropy, hysteresis, and morphology of self-patterned epitaxial Fe/MgO/GaAs films / F. Cebollada, A. Hernando-Mañeru, A. Hernando, C. Martínez-Boubeta, A. Cebollada, J.M. González // Physical Revue: B. – 2002. – Vol. 66. – P. 174410.
14. Navarro, E. Coercivity and morphology in Fe/NiO films deposited on nanoporous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> membranes Coercitividad y morfología en películas de Fe/NiO depositadas sobre membranas porosas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / E. Navarro, F.J. Palomares, M. Alonso, F. Cebollada, G. Dominguez-Cañizares, A. Gutierrez, L. Soriano, J. M. González // Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio. – 2015. – Vol. 54. – Issue 6. P. 241–246.
15. Hoffman, H. Sättigungsmagnetisierung und Anisotropiefeldstärke in dünnen Eisenaufdampfschichten / H. Hoffman // Zeitschrift für Physik. – 1961. – Vol. 165. – Iss. 3. – P. 261–287.
16. Stunkel, D. Die Magnetisierung sehr dünner Eisenschichten / D. Stunkel // Zeitschrift für Physik. – 1963. – Vol. 176. – Iss. 3. – P. 207–220.
17. Тарасов, И.А. Эллипсометрическая экспресс-методика определения толщины и оптических постоянных в процессе роста наноструктур Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) / Н.Н. Косырев, С.Н. Варнаков, С.Г. Овчинников, С.М. Жарков, В.А. Швец, О.Е. Терещенко // Журнал технической физики. – 2012. – Т.82. – Вып. 9. – С. 44–48.
18. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.; Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

---

Отпечатано в типографии Института физики им. Л.В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения  
ФИЦ КНЦ СО РАН, Тираж 100 экз. Заказ №04  
Объем 1,16 печ. л. Формат 60×84/16.  
660036, Красноярский край,  
г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 38