



УТВЕРЖДАЮ  
Директор Института сильноточной  
электроники СО РАН  
Академик РАН

*Н.А. Ратахин*

Н.А. Ратахин

«30» 08 2019 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Шевцова Дмитрия Валентиновича «**Разработка сверхвысоковакуумного комплекса для получения и *in situ* исследования наноструктур методом спектральной магнитооптической эллипсометрии в широком температурном диапазоне**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**Актуальность работы.** Для проведения исследований в области низкоразмерных структур незаменимым инструментом являются сверхвысоковакуумные комплексы, ориентированные на исследования и модификацию объектов нанометрового размера, используемые для создания упорядоченных гомо- и гетероструктур с атомарной точностью, а также устройств на их основе. При проектировании и создании технологического оборудования интерес представляют не только свойства создаваемых структур, но и возможность неразрушающей диагностики материалов в процессе их создания, которая позволила бы получать структуры с желаемыми характеристиками. Для такого типа диагностики хорошо зарекомендовала себя отражательная эллипсометрия, как неразрушающий *in situ* метод анализа поверхности. Одним из достоинств данной поляризационной оптической методики является то, что она позволяет производить магнитооптический анализ тонких плёнок при помещении ферромагнитного образца во внешнее магнитное поле. Так же хорошо известно, что некоторые характеристики наноструктур можно исследовать при проведении измерений только при низких или только при высоких температурах образца. В связи с этим, актуальным является вопрос о создании *in situ* спектральных магнитоэллипсометрических систем с возможностью задания температуры образца в широком диапазоне.

Кроме того, важным является развитие исследовательской аппаратуры, позволяющей в едином технологическом цикле синтезировать и получать информацию о морфологии поверхности образца, его спектральных оптических и магнитооптических параметрах в широком температурном диапазоне.

**Целью работы** Шевцова Д.В. являлась разработка сверхвысоковакуумного комплекса, позволяющего в едином технологическом цикле проводить синтез и *in situ* исследование наноструктур методом спектральной магнитооптической эллипсометрии в температурном диапазоне от 85 до 900 К.

В ходе выполнения диссертационной работы для достижения поставленной цели автором был решен ряд задач:

1. Была определена компоновка технологического комплекса для реализации сверхвысоковакуумной технологии синтеза низкоразмерных структур с возможностью проведения *in situ* одноволновых и спектральных (300–900 нм) эллипсометрических исследований.

2. Разработана магнитная система для реализации *in situ* магнитоэллипсометрических исследований.

3. Разработана система манипулятора-держателя, позволяющая проводить *in situ* магнитоэллипсометрические исследования в температурном диапазоне 85–900 К.

4. Разработана и апробирована методика неразрушающей *in situ* магнитоэллипсометрической диагностики наноразмерных структур в температурном диапазоне 85–900 К.

В ходе решения каждой из задач получены новые и научно-значимые результаты.

Диссертация представлена на 131 странице и состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы (142 наименования) содержащего обширную и достаточную библиографию по всем вопросам, рассмотренным в диссертации. Текст диссертационной работы достаточно иллюстрирован и содержит 45 рисунков.

**Во введении** изложены цель и задачи работы, обосновывается её актуальность, представлены выносимые на защиту положения и описана практическая значимость полученных результатов исследования.

**Первая глава** диссертации посвящена достаточно подробному обзору литературы, автор рассматривает большой список подходов и методов получения тонких пленок и исследования эллипсометрическими и магнитооптическими методами, а также дан обзор технологическим решениям для проведения температурных эллипсометрических и магнитооптических исследований наноструктур. Анализ литературных данных позволил сформулировать цель работы и определить последовательность решения основных задач.

**Вторая глава** полностью посвящена разработке тестовых систем нагрева и охлаждения образцов в температурном диапазоне от 85 до 900 К, в которой так же продемонстрировано моделирование процессов нагрева для разработанной тестовой конструкции держателя образца.

**В третьей главе** диссертации приведены результаты разработки и изготовления основных систем и узлов, а также специальной оснастки сверхвысоковакуумной камеры, необходимых для применения метода спектральной магнитооптической эллипсометрии в широком диапазоне температур, и результаты проведенных испытаний. Дана оценка работоспособности: эллипсометрической системы, системы нагрева и охлаждения, напылительной и магнитной систем.

**Четвертая глава** описывает реализованное практическое применение полученных результатов, а именно тестирование разработанного магнитоэллипсометрического комплекса в едином цикле на примере получения и исследования структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100).

В конце каждой главы делаются краткие выводы, **в заключении** работы представлены основные результаты исследований. Объем полученных результатов и их количество вполне достаточно для диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Следует отметить, что автору удалось провести полный цикл исследовательской работы, включая расчетную часть и создание действующей установки.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждаются применением современных методов исследований, теоретическими расчетами и моделированием, а также результатами многочисленных экспериментов.

Достоинством работы является то, что её результаты были использованы при выполнении нескольких научно-исследовательских проектов, а также тем, что по теме диссертационной работы были получены 2 патента РФ и зарегистрировано 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

Тема диссертации соответствует специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики». Основные результаты диссертации опубликованы в 7 работах. Содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации.

**Новизна результатов**, полученных Шевцовым Д.В., заключается в том, что благодаря особенностям разработанной и созданной им конструкции в сверхвысоковакуумной ростовой камере удалось в рамках одного эксперимента совместить не только возможность проведения *in situ* исследований оптических и магнитных свойств, синтезированных наноструктур в диапазоне толщин от 1 до 100 нм в широком диапазоне температур, но и возможность создания начальных условий формирования этих структур, с помощью задания начальных температур от 85 до 900 К и магнитного поля в диапазоне от -6 до +6 кЭ.

#### **Практическая значимость полученных автором результатов.**

Конструктивные решения в разработанном Шевцовым Д.В. сверхвысоковакуумном комплексе позволяют исключить влияние атмосферы на получаемые наноструктуры при *in situ* магнитооптических измерениях в широком диапазоне температур, что может способствовать получению новых фундаментальных знаний о различных материалах, таких, например, как начало формирования магнитного состояния, температуры движения доменных стенок, определение условий смены типа роста при молекулярно-лучевой эпитаксии и др.

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).

Разработанная конструкция манипулятора-держателя и исследовательская методика дают возможность получения наноструктур с металлическими, полупроводниковыми и диэлектрическими слоями, совмещёнными на одной подложке монокристалла кремния.

#### **Оценка содержания диссертации, ее завершенности**

Диссертация является завершенным научным исследованием и содержит решение всех поставленных задач. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики». Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 9 работах, из них 7 статей опубликовано в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК РФ. О необходимом уровне освещения полученных научных результатов в печати свидетельствует список публикаций. Опубликованные работы соответствуют тематике, основным положениям и выводам диссертационной работы.

Качество оформления диссертации высокое. По каждой главе сформулированы содержательные выводы, что облегчает понимание и анализ материала. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1) Известно, что при учёте высокой чувствительности эллипсометрических измерений к состоянию поверхности, малейшие дефекты на поверхности, нарушающие ее плоскость, могут самым катастрофическим образом сказаться на результатах измерения оптических постоянных. В диссертации не говорится о состоянии поверхности – шероховатости и наличии тонких адсорбированных плёнок, которые могут возникать в том числе при криогенных температурах. Не приведены оценки по скорости осаждения адсорбирующихся газов.

2) В диссертации указано, что при нагревании подложки до 600 К интенсивность её собственного теплового излучения на порядки превышает интенсивность зондирующего луча. Как обеспечивается точность эллипсометрических измерений при температурах (85-900) К, указанных как рабочий диапазон созданного сверхвысоковакуумного комплекса?

3) В работе не проведены сравнительные исследования и не обсуждается влияние протекания тока через кремниевую подложку на процессы роста пленки Fe, на структуру этой пленки и результаты магнитоэллипсометрических измерений.

4) К замечаниям можно отнести то, что не были проведены *in situ* исследования формирования плёночных структур при предельно низких и высоких температурах в диапазоне (85-900) К.

Сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диссертация Д.В. Шевцова является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, имеющих существенное значение в области разработки и создания экспериментальных установок для проведения экспериментальных исследований в различных областях физики и для дальнейшего развития технологии изготовления устройств спинтроники на кремниевой основе.

Таким образом, считаем, что диссертация Д.В. Шевцова соответствует всем требованиям ВАК и требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 21 апреля 2016 г. № 335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Д.В. Шевцов заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв на диссертацию Шевцова Д.В. обсужден и одобрен на расширенном научном семинаре лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности Института сильноточной электроники СО РАН в качестве отзыва ведущей организации (протокол № 1/04 от 27 августа 2019 г.).

Кандидат технических наук  Денисов В.В.

Денисов Владимир Викторович,

кандидат технических наук, заведующий лабораторией пучково-плазменной инженерии поверхности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Почтовый адрес: г. Томск, 634055, проспект Академический, д. 2/3.

Телефон: 8 (3822) 49-26-83, адрес электронной почты: denisov@opee.hcei.tsc.ru.

Подпись В.В. Денисова заверяю:

Ученый секретарь ИСЭ СО РАН

д.ф.-м.н.



И.В. Пегель

«28» « 08 » 2019 г.