

## ОТЗЫВ

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

**Актуальность работы.** Для решения задач современной электроники активно применяются сверхвысоковакуумные исследовательские комплексы. Использование их особенно перспективно для создания новых материалов и объектов нанометрового масштаба, а также их интеграции с существующими технологиями с целью миниатюризации устройств электроники и спинтроники. Одним из основных требований, предъявляемых к этим комплексам, является возможность неразрушающей диагностики материалов в процессе их синтеза. Такую возможность обеспечивают оптические методы, в частности, отражательная эллипсометрия. Она хорошо себя зарекомендовала, как неразрушающий метод анализа поверхности, позволяющий проводить исследования процессов роста тонких пленок *in situ*. Поляризационные оптические методы позволяют также анализировать магнитные свойства тонких плёнок. Однако до сих пор имеется недостаток исследовательской аппаратуры, позволяющей в едином технологическом цикле синтезировать магнитные наноструктуры и проводить их комплексный анализ *in situ*. Большой проблемой, в частности, является исследование зависимости магнитных свойств формируемых тонких пленок от их толщины и температуры. Поэтому тема диссертации Шевцова Д. В., нацеленной на разработку сверхвысоковакуумного комплекса для получения магнитных наноструктур и исследования их в широком температурном диапазоне *in situ* методом спектральной магнитооптической эллипсометрии, безусловно, является актуальной.

Для достижения поставленной цели автором решены следующие научно-технические задачи:

1. Определена оптимальная компоновка технологического комплекса для реализации сверхвысоковакуумной технологии синтеза низкоразмерных структур с возможностью проведения *in situ* одноволновых и спектральных эллипсометрических исследований.

2. Разработана магнитная система для реализации *in situ* магнито-эллипсометрических исследований.

3. Разработана и изготовлена система манипулятора-держателя, позволяющая проводить магнитоэллипсометрические исследования в широком диапазоне температур.

4. Разработана и апробирована методика неразрушающей *in situ* магнито-эллипсометрической диагностики низкоразмерных структур в диапазоне температур 85 – 900 К.

**Новизна результатов**, полученных Шевцовым Д.В., заключается в том, что разработанный и созданный им сверхвысоковакуумный комплекс позволяет оптимальным образом синтезировать и исследовать *in situ* оптические и магнитные свойства наноструктур в диапазоне толщин от 1 до 100 нм. Его главной отличительной особенностью является возможность управления начальными условиями формирования тонких магнитных пленок путем варьирования температуры их роста в интервале от 85 до 900 К, а также магнитного поля в диапазоне от – 6 до + 6 кЭ. Разработанный комплекс позволяет проводить не только одноволновые, но и спектральные эллипсометрические исследования в диапазоне длин волн от 300 до 900 нм без искажающего влияния атмосферы на синтезируемые наноструктуры. Отмеченные особенности созданной исследовательской аппаратуры, будут, несомненно, способствовать решению актуальных задач развития технологий получения новых функциональных материалов.

**Общая характеристика работы.** Диссертация Шевцова Д. В. построена традиционным образом. Она состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 142 наименований. Объем диссертации - 131 с., включая 45 рисунков. Во **введении** изложены цель и задачи работы, обоснована актуальность исследования, сформулированы выносимые на защиту положения и раскрыта практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава** диссертации представляет собой достаточно подробный обзор литературы по тематике проведенного исследования. Автор проанализировал основные способы роста тонких пленок, а также их анализа эллипсометрическими и магнитооптическими методами. При этом особое внимание уделено специфике технологических решений для проведения магнитооптических исследований наноструктур в широком диапазоне температур. Анализ литературных данных позволил логично сформулировать цель работы и определить последовательность решения основных задач.

**Вторая глава** посвящена разработке тестовых систем нагрева и охлаждения образцов, позволяющих проводить исследования в температурном интервале от 85 до 900 К. В ней также представлены результаты моделирования процессов нагрева для разработанного автором держателя образцов.

**В третьей главе** диссертации подробно описаны разработанные автором системы и узлы сверхвысоковакуумной камеры, необходимые для практической реализации метода спектральной магнитооптической эллипсометрии. К ним относятся магнитная система, система шлюзовой загрузки и вакуумного затвора, транспортная вакуумная система, держатель образца, системы его нагрева, подачи жидкого азота и др. Здесь же представлены результаты испытаний специальной оснастки сверхвысоковакуумной камеры и тестирования магнитной системы.

**В четвертой главе** приведены результаты испытаний созданного автором комплекса для исследования наноструктур методом спектральной магнитооптической эллипсометрии. Они проводились на примере структуры Fe/SiO<sub>2</sub>/Si, синтезированной в этой же установке. На первом этапе эксперимента на поверхности Si(100) была сформирована пленка диоксида кремния толщиной 25 нм, а затем – пленка железа толщиной 17 нм. Далее для этой системы был проведен цикл спектральных эллипсометрических и магнито-эллипсометрических измерений, выполненный в диапазоне температур от 85 до 1100 К. Проведенные измерения не только доказали работоспособность созданного измерительного комплекса, но и позволили получить ряд **новых результатов, имеющих научную и практическую значимость**. Так, например, из анализа температурных зависимостей формы петель перемагничивания и эллипсометрических углов был сделан вывод том, что при нагреве образца Fe/SiO<sub>2</sub>/Si(100) до температуры более 1100 К пленка железа претерпевает фазовый переход из ферромагнитного состояния в парамагнитное. В ходе этого процесса необратимо изменяется и морфология поверхности пленки. Установлено, в частности, что поверхность образца приобретает островковую структуру, причем средний продольный размер островков составляет 363 нм.

**Обоснованность и достоверность** результатов работы сомнений не вызывают. Они подтверждаются применением современных методов исследований, теоретическими расчетами и моделированием, а также согласием результатов экспериментов с литературными данными в тех случаях, когда такое сопоставление возможно.

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

1. В работе не проанализировано влияние процессов охлаждения и нагрева образца на точность оптических измерений, хотя, как известно,

изменение температуры способно менять показатели преломления и поглощения вещества.

2. Автором не рассмотрено влияние электрического поля, возникающего вблизи подложки при нагреве образца, а также прикладываемого магнитного поля на начальные стадии роста магнитных пленок.

3. В диссертации, в отличие от автореферата, отсутствует единый список публикаций автора по теме диссертационной работы.

Отмеченные замечания не ставят под сомнение защищаемые положения диссертации и не снижают ценности проведенного исследования. Результаты работы были использованы при выполнении ряда научно-исследовательских проектов ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России». Они прошли всестороннюю апробацию на специализированных международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 9 статей (из них 4 – в журналах, индексируемых системой Web of Science), 2 патента РФ и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Содержание автореферата полностью соответствует диссертации. В диссертации и автореферате отсутствуют некорректные заимствования без правильно оформленной ссылки на первоисточник.

**Заключение.** В целом диссертационная работа Шевцова Д. В. «Разработка сверхвысоковакуумного комплекса для получения и *in situ* исследования наноструктур методом спектральной магнитооптической эллипсометрии в широком температурном диапазоне» является самостоятельным и законченным исследованием, выполненным автором на актуальную тему. Диссертация соответствует профилю диссертационного совета, паспорту заявленной специальности (п. 2, 5, 7, 8) и всем требованиям, предъявляемым ВАК Министерства образования и науки РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук (пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от

21.04.2016 г. № 335). Автор диссертационной работы, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

**Официальный оппонент:**

Пронин Игорь Иванович, доктор физ.-мат.  
наук по специальности 01.04.04  
«Физическая электроника»,  
главный научный сотрудник,  
заведующий лабораторией «Физики  
элементарных структур на поверхности»  
в Физико-техническом институте  
им. А.Ф. Иоффе.  
Адрес: 194021 Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая д. 26.  
Телефон: +7(812) 2927948  
E-mail: igor.pronin@mail.ioffe.ru.

«19» сентября 2019 г.  Пронин Игорь Иванович

Подпись главного научного сотрудника, заведующего лабораторией Физики элементарных структур на поверхности Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, Пронина Игоря Ивановича заверяю.

