

## 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 темы.** Развитие физики и технологии полупроводниковой индустрии в микро- и нанoeлектронике в настоящее время, идет по пути перехода топологии функциональных элементов от микроразмеров к нанометровой геометрии, что требует создания нового типа кластерного оборудования для синтеза и исследования свойств и процессов в искусственно создаваемых наноструктурах, а также усовершенствование существующих методов комплексной диагностики получаемых наноструктур. В современном мире цифровых технологий с переходом к нанoeлектронике становится актуальной задача реализации всех возможных технологических процедур в едином нанотехнологическом комплексе, снабжённом средствами обработки, синтеза и исследования структур. По мнению большинства экспертов, междисциплинарные технологии, оперирующие объектами с нанометровыми линейными размерами, будут иметь революционное значение в ближайшем будущем. 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.

Особый 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. Кроме того, данная поляризационная оптическая методика позволяет производить и магнитооптический анализ тонких плёнок при помещении ферромагнитного образца во внешнее магнитное поле. 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.

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 в широком температурном диапазоне.

Диссертация Шевцова Д.В. посвящена разработке сверхвысоковакуумного комплекса для получения и *in situ* исследования наноструктур методом спектральной магнитооптической эллисометрии в широком температурном диапазоне.

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

Первая глава носит обзорный характер и посвящена методам получения тонких пленок и исследования эллисометрическими методами. Вторая и третья главы посвящены разработке тестовых систем нагрева и охлаждения образцов в температурном диапазоне 85–900 К и специальной оснастки сверхвысоковакуумной камеры. В четвертой главе приводятся результаты тестирования разработанного магнитоэллисометрического комплекса.

Особо хотелось бы отметить, что разработанный Шевцовым Д.В. сверхвысоковакуумный комплекс для получения и *in situ* исследования наноструктур методом спектральной магнитооптической эллисометрии в широком температурном диапазоне может существенно продвинуть метод магнитоэллисометрии, как метод неразрушающей *in situ* эллисометрической диагностики в широком диапазоне температур (85–900 К).

**Оценка новизны и практическая значимость.** Научная новизна диссертации заключается в том, что соискателем удалось в рамках одного эксперимента совместить не только возможность проведения *in situ* исследований оптических и магнитных свойств, синтезированных наноструктур (толщиной 1–100 нм) в широком диапазоне температур, но и задавать начальные условия формирования этих структур, с помощью задания начальных температур и магнитного поля в диапазоне 85–900 К и –6 до +6 кЭ благодаря особенностям разработанной и созданной им конструкции в сверхвысоковакуумной ростовой камере. Таким образом, разработанный сверхвысоко-вакуумный комплекс позволяет исключить влияние атмосферы на получаемые структуры 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.

**Практическая значимость** работы состоит в разработке и изготовлении напылительного сверхвысоковакуумного комплекса, который может быть

применён в технологических процессах получения изделий наноэлектроники, 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, для развития технологии изготовления устройств спинтроники на кремниевой основе.

В диссертации показано, что **достоверность** результатов измерений с помощью разработанного сверхвысоковакуумного комплекса обеспечена:

1. использованием апробированных современных экспериментальных методов и оборудования для получения и исследования материалов, а также, корректной оценкой погрешностей измерений.
2. комплексным подходом при исследовании структурных, магнитных, оптических и магнитооптических свойств – для получения информации использованы как *in situ* так и *ex situ* методы исследования включая спектральную эллипсометрию, магнитоэллипсометрию, рентгеноспектральный флуоресцентный анализ и растровую электронную микроскопию.
3. соответствием общепринятым представлениям и результатам полученных в других исследованиях, опубликованных в реферируемых российских и зарубежных научных журналах.

**Замечания по диссертационной работе.** При общей высокой оценке работы, следует отметить некоторые её недостатки, как по форме, так и по содержанию:

1. В диссертации не полностью раскрыты преимущества разработанного комплекса перед существующими аналогами.
2. Из диссертации ясно, что разработанный комплекс позволяет получать наноструктуры при температурах подложки в диапазоне 85-900К, однако результатов экспериментов (*in situ*) по получению структур при различных температурах не приведено.
3. Из текста диссертации не совсем понятно, низкие (криогенные) температуры нужны только для исследований или также для проведения экспериментов по напылению?
4. Не раскрыто влияния процесса пропускания тока через подложку при нагреве на рост пленок, как учитывается данный процесс, как анализируется?

В целом работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а отмеченные недостатки не снижают её положительной оценки.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа Шевцова Д. В. «Разработка сверхвысоковакуумного комплекса для получения и *in situ* исследования наноструктур методом спектральной магнитооптической эллипсометрии в широком температурном диапазоне», соответствует паспорту специальности 01.04.01 – «Приборы и методы

экспериментальной физики», выполнена на высоком научно-техническом уровне, актуальна, обладает новизной и существенной практической ценностью.

Работа соответствует профилю диссертационного совета, паспорту заявленной специальности (п. 2, 5, 7, 8) и 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), а её автор Шевцов Дмитрий Валентинович, - достоин присвоения учёной степени кандидата технических наук, по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент:

Семенов Валентин Георгиевич

доктор физико-математических наук, по специальности 01.04.01 специальности «Приборы и методы экспериментальной физики», профессор,

Институт химии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»,

Заместитель заведующего кафедрой аналитической химии,

Телефон: +7 951 684 15 37

E-mail: val\_sem@mail.ru.

«23» сентября 2019 г.

Семенов Валентин Георгиевич

Подпись Семенова Валентина Георгиевича заверяю:

Личную подпись заверяю

начальник отдела кадров №3

Н. И. МАШТЕП



Документ подготовлен  
в порядке исполнения  
трудовых обязанностей