

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу  
ТОМИЛИНА Сергея Владимировича «Влияние размерных эффектов  
на свойства электронной подсистемы металлических островковых пленок»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного  
состояния

Диссертационная работа Томилина С.В. посвящена синтезу нано-островковых пленок металлов и исследованию их электрических и оптических свойств с особым вниманием к размерным эффектам. Островковые пленки представляют собой примеры структур, включающих компоненты нано-метровых размеров во всех направлениях, обладающих уникальными электронными и оптическими свойствами. Особый импульс исследованиям таких структур придает их огромный прикладной потенциал. В связи с этим становятся актуальными исследования, направленные на создание новых типов структур, оптимизацию их свойств и обеспечение условий для возбуждения связанных с размерными эффектами резонансов, в частности, плазмонных колебаний. Вышесказанное позволяет сделать заключение о несомненной **актуальности** и важности обсуждаемой работы.

Диссертационная работа состоит из введения, литературного обзора по теме исследования (Глава 1), четырех глав, содержащих оригинальные результаты, и заключительной части, включающей основные результаты и выводы. Список использованных источников включает 142 наименования. Список публикаций автора из 34 наименований приведен отдельно. Диссертация изложена на 177 страницах текста, содержит 73 рисунка и 9 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность работы, показана связь ее содержания с программами и планами организации, сформулированы цель и задачи, обозначены объекты, изучаемые свойства и методы исследования, указаны новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов и выводов, перечислены конференции, где были представлены результата работы, а также показан личный вклад автора. *Пожалуй, не стоило так назойливо подчеркивать «впервые» в параграфе «Научная новизна», его название и так предполагает, что все представленные в нем результаты и выводы получены впервые.*

**В первой главе** приведен обзор основных методов изготовления сверхтонких и островковых металлических пленок, рассмотрены современные представления о механизмах их формирования при использовании методов конденсации в высоком вакууме. Рассмотрены

особенности проводимости островковых пленок. Подробно представлены теоретические подходы к описанию поверхностного плазмонного резонанса в сплошных пленках и малых наночастицах, описано различие между этими двумя ситуациями, которые чрезвычайно важны с точки зрения настоящего исследования, поскольку островковые пленки (главный объект исследования) можно рассматривать как промежуточный случай между этими двумя предельными структурами. Автор удачно справился с задачей и показал нерешенные проблемы, из которых естественно вытекает цель работы. Дан также обзор опубликованных работ по тематике диссертации. Необходимо отметить ясность и хороший уровень изложения материала, демонстрирующие хорошую ориентацию автора в проблематике исследований.

**Вторая глава** посвящена методам изготовления и исследования образцов, использованным автором, а в значительной части, усовершенствованным или предложенным им впервые. Прежде всего, стоит отметить остроумное изобретение, названное автором «тонкой заслонкой», которое позволяет в едином цикле получать градиентные по толщине островковые пленки с заданными параметрами, что предопределило успех всей работы. Не менее интересна оригинальная двух зондовая система для снятия вольт-амперных характеристик островковых пленок. Сконструирован и изготовлен специальный предметный столик для исследования оптических характеристик островковых пленок с точностью позиционирования образца 0.1 мм. Все эти устройства защищены авторскими свидетельствами. Так что, эта глава в значительной степени является оригинальной. Забегая вперед, отметим, что предложенные автором технические решения могли бы быть использованы на предприятиях, разрабатывающих оборудования для нано-технологических производств. Это характеризует практическую значимость работы.

*На будущее хотелось бы пожелать автору заменить некоторые механические элементы в разработанных им устройствах на пьезо-керамику, что позволило бы в десятки раз поднять точность устройств и автоматизировать управление.*

**В третьей главе** представлены результаты исследования структурных свойств синтезированных пленок в зависимости от условий их формирования. Детально проанализированы механизмы формирования островковых образований для случаев термоактивированной грануляции сплошных тонких пленок и наноостровковых пленок, полученных методом «тонкой заслонки». В обоих случаях анализ проведен на примерах конкретных металлов. В первом случае рассматриваются только пленки палладия, осаждаемые на кремний. Во втором случае использовались титан и палладий, также осаждаемые на кремний. Наиболее интересные результаты получены для ряда металлов на различных подложках, включая диэлектрики, при комбинировании обоих методов, указанных выше. При этом реализована возможность управления формой, размерами и распределением

островков по поверхности подложки. Полученные результаты и их анализ представляют как фундаментальный, так и прикладной интерес и весьма важны для синтеза образцов с требуемыми свойствами. Представлялось бы желательным в начале главы указать набор исследуемых металлов, обосновать их выбор, пояснить, почему для термо-активационного метода выбран именно только палладий, что изменится для других металлов.

**В четвертой главе** описаны особенности электрических свойств пленок, обусловленные размерными эффектами. Было проведено несколько исследований различной направленности. Это исследование свойств контакта сверхтонкой или островковой пленки палладия с подложкой монокристаллического кремния; это влияние размерных эффектов на проводимость самих пленок, осажденных на диэлектрическую подложку, для целой группы металлов с большим разбросом температур плавления, что позволяло получать в результате отжига различную морфологию островков; это исследование проводимости пленок в процессе осаждения. Все измерения проводились непосредственно в вакууме с помощью устройств, разработанных автором и описанных по второй главе. Впечатляет объем, полученных при этом результатов. Автор также предложил модель активационного прыжкового механизма проводимости в дискретных металлических структурах, позволившую адекватно описать полученные экспериментальные результаты. Собственно говоря, одна эта глава могла бы составить предмет целой диссертации. Перечислим только некоторые результаты. Показано, что сверхтонкая пленка палладия на подложке кремния с электронным типом проводимости образует контакт Шоттки, и свойства этого контакта зависят от степени грануляции пленки. Обнаружено, что проводимость металлических пленок Sn, Al, Cu, Ni, Fe, Ti, Pt растет в процессе их формирования на диэлектрических подложках и спадает после прекращения осаждения. Обнаружены три характерные области на температурных зависимостях проводимости сверхтонких и островковых пленок, связанные с различными механизмами, и установлены эти механизмы. Показано, что для наноостровковых пленок характерен гистерезис температурной зависимости проводимости, параметры которого зависят от эффективной толщины пленок и от типа металла. Все обнаруженные эффекты объяснены вполне правдоподобно.

**В пятой главе** представлены результаты исследования оптических свойств пленок золота на диэлектрических подложках различного типа. Анализ данных оптической спектроскопии опирается на морфологические характеристики образцов. Разработанная автором методика синтеза пленок, описанная во второй главе, позволила создать набор образцов с закономерно изменяющимися геометрическими характеристиками островков золота на подложках ГГГ и проследить зависимость положения плазмонных резонансов от размеров островков. Особенно эффектно выглядят результаты, полученные на градиентных

пленках, подвергнутых отжигу. Они четко демонстрируют зависимость морфологии островков от толщины пленки при всех остальных одинаковых условиях их формирования.

Весьма оригинальный результат получился для структуры Bi:YIG/Au/GGG, полученной путем осаждения пленки феррита-граната на ранее сформированные островковые пленки золота, представленные на рис. 5.7. После повторного отжига сформировались островки золота, покрытые шубой из феррита-граната. При этом не только изменились параметры плазмонов, возбуждаемых в исходных пленках с островками золота, но и появился третий пик, пока не до конца ясной природы. Автор диссертации не ограничился наблюдением плазмонных резонансов, но и провел детальный количественный анализ их параметров.

Следует также отметить исследование пленок в отраженном свете и сравнение полученных при этом спектров со спектрами, записанными в проходящем свете для всех типов исследованных пленок. Это позволило автору установить принципиальную разницу между однородными и островковыми пленками и прийти к выводу, что в случае сверхтонких однородных пленок генерируются только поверхностные плазмон-поляритонные резонансы в то время, как в островковых пленках наблюдается возникновение только локализованных плазмонов.

К недостаткам изложения материала в этой главе следует отнести перегруженность однотипных рисунков 5.3, 5.5 и 5.7, тем более, что параметры островков для всех случаев собраны в Таблице 5.2. В то же время резкое уменьшение критического размера островков при отжиге при 950 С оставлено без объяснения. На стр. 137, где обсуждаются дипольный и квадрупольный резонансы в зависимости от толщины покрытия, остался незамеченным факт отсутствия последнего при некоторых промежуточных толщинах.

Достоверность полученных результатов не вызывает у меня сомнений. Она гарантируется ответственным подходом автора к каждому этапу исследований, начиная от методических разработок и кончая современным анализом полученных результатов. Результаты опубликованы в журналах, индексируемых в WoS, и обсуждались на огромном количестве научных форумов.

К несомненным достоинствам диссертации можно отнести гармоничное сочетание экспериментальных методов исследования и теоретического анализа полученных результатов. Особенно хотелось бы подчеркнуть стремление автора досконально разобраться в проблеме и логически завершить исследование построением картины, объясняющей все обнаруженные факты и явления.

При обсуждении отдельных глав были отмечены некоторые недостатки изложения. Кроме них, надо указать на совершенно хаотичное упоминание в тексте публикаций других

авторов. Первая ссылка появляется на стр. 15, и это ссылка на номер 16 в списке публикаций, ссылки на номера 1 и 15 не удалось обнаружить в тексте, вообще, ссылки на номера 2 и 3 в списке публикаций появились в тексте на стр. 90 после ссылки на номер 142, и так далее. Кажется, не совсем оправданным включение значительного количества источников не достаточно широкого доступа, таких как, например, 13, 28, 49, 50, 60, 89, 127, 128. Для мало распространенного сборника 113 не указаны выходные данные, кроме номеров страниц.

Встречаются неудачные выражения такие, как, например, на стр. 37 «...неоднозначным остается вопрос...» или на стр. 33. «При возбуждении электромагнитным излучением металлических наночастиц...». Возбуждаются все же не частицы, а их электронная подсистема, как это правильно указано в подписи к рис. 1.10. Во втором абзаце на стр. 20, по-видимому, следует говорить не о свободно диффундирующих, а о мигрирующих атомах.

Многократно повторяются некоторые описания. Видимо, стоило бы при первом описании присвоить образцам обозначения и затем пользоваться ими. Так, например, абзац «Для изготовления образцов в качестве подложек были использованы пластины полупроводникового кремния марки КЕФ-0.35 «электронного» качества (Si подложка) толщиной  $400\pm20$  мкм, полированные с обеих сторон (шероховатость поверхности  $< 10$  нм), с ориентацией поверхности (111). Подложки перед напылением обрабатывались в 10%-растворе плавиковой кислоты (HF) для снятия окисного слоя», впервые использованный на стр. 59, затем еще повторяется дважды на стр. 78 и 90. На рис. 3.12 в и г не указан масштаб по осям  $x$  и  $y$ , а по оси  $z$  указан настолько мелко, что не разобрать; на стр. 5 написано «ГЩ» вместо «ГПУ»; на стр. 15 вместо «газе-носителе» написано «гаге-носителе».

Однако отмеченные недостатки относятся, главным образом, к стилю изложения, ни в коей мере не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Томилина С.В. и не снижают высокий научный уровень обсуждаемой работы.

Результаты диссертации могут быть использованы в академических институтах и ВУЗах, а также на предприятиях, связанных с технологиями наноматериалов. В частности, это Физико-технический институт им. Иоффе РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Севастопольский государственный университет, Корпорация «Роснано», «Российский квантовый центр» Сколково и т.д.

Диссертация представляет собой логически завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему, выполненную на высоком научном, техническом и технологическом уровне. Представленные в диссертационной работе результаты и сделанные на их основании выводы обоснованы и достоверны. Они имеют как научную, так и прикладную ценность. Результаты опубликованы в ведущих научных журналах, включенных

в перечень ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Томилина С.В. «Влияние размерных эффектов на свойства электронной подсистемы металлических островковых пленок» полностью отвечает требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых ВАК к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук (Постановление правительства РФ № 842 от 24.09.2013 с изменениями от 21.04.2016 г. № 335), а ее содержание соответствует паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния. Автор диссертации Томилин Сергей Владимирович вполне заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,  
главный научный сотрудник лаборатории  
физики магнитных явлений Института физики  
им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

*И.Эдельман*

И.С. Эдельман

Подпись И.С. Эдельман заверяю  
Учёный секретарь ИФ СО РАН

*И.С. Томилинов А.О.*

подпись, ФИО

«15» марта 2018 г.

