

## Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Цуканова Дмитрия Анатольевича «Электрическая проводимость наноструктур на реконструированных поверхностях кремния», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

### **Актуальность темы выполненной работы, её связь с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства**

Развитие микроэлектроники с учётом требований современности к минимизации размеров микросхем требует от исследователей нового подхода как к созданию схем нового поколения, так и к изучению физических процессов и явлений на поверхности с учётом перехода от микроразмерных объектов к наноразмерным. Актуальность представленной диссертационной работы определена уже самими объектами исследования, которые являются квантово-размерными и имеют практическое значение для создания полупроводниковых устройств наноразмерного масштаба. Диссертационная работа актуальна и с точки зрения теории физики поверхности и физики полупроводников, так как в настоящее время нет единой детально разработанной теории, описывающей физические процессы на уровне монослойных и квантово-размерных поверхностей. Многообразие явлений, обеспечивающих вклад в электропроводность поверхностных фаз наноразмерных объектов, и влияние структурных дефектов на электрофизические свойства необходимо дополнить новыми знаниями и систематизировать. Тема диссертационной работы Цуканова Д. А. соответствует Перечню критических технологий Российской Федерации, а именно пункту 11 – «Технологии диагностики наноматериалов и наноустройств» и пункту 17 – «Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов» в соответствии с Указом Президента РФ № 899 от 07.07.2011, диссертационные исследования выполнены в соответствии с государственными контрактами в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» и в соответствии с планами научных исследований ИАПУ ДВО РАН.

### **Общая методология и методика исследования**

Рассматривая общеметодологические аспекты диссертационной работы, следует отметить, что автор в процессе поиска путей исследования и построения теории метода исследования весьма удачно использовал формы фиксации, воспроизводства и упорядочивания методологического знания в виде нескольких схем и их совокупности. В качестве исходной опорной единицы методологического анализа выбрана структура поверхностной фазы на кремнии, причём корректность выбора первичной единицы определила начальные условия логичного пути исследования. Пункт ветвления обеспечен различными элементными составами поверхностных фаз, обуславливающими развёртывание пути исследования. В качестве ключевой опорной

единицы общей методологии избран экспериментальный подход с использованием ряда апробированных физических методов исследования структуры и свойств неорганических веществ и материалов с учётом особенностей протекающих на поверхности явлений. Выходной пункт, фиксирующий завершение пути, обозначен в виде сформулированных защищаемых положений.

Методика исследования включает совокупность экспериментальных методов исследования структуры и свойств поверхности: метод дифракции медленных электронов, метод сканирующей туннельной микроскопии, четырёхзондовый метод измерения удельного сопротивления, метод измерения поверхностной проводимости, а также анализ и систематика полученных результатов исследования, способы определения погрешностей эксперимента и выявления корреляции электрофизических свойств поверхностных фаз на кремнии со структурой. Рациональное планирование экспериментальной части диссертационного исследования и использование сверхвысоковакуумного оборудования с последующим анализом, обобщением и формулировкой выводов позволили автору достичь цели.

#### **Внутренне единство структуры работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключительной части с основными результатами и выводами, списка используемых литературных источников из 657 наименований, содержание диссертации изложено на 338 страницах.

Последовательность выполнения исследований в соответствии с выбранными автором методологическими схемами в совокупности с логичностью изложения материала обеспечили внутренне структурное единство диссертационной работы Цуканова Д. А. Так, автор после краткого введения с обоснованием актуальности, определения цели, постановки задач исследования, описания научной новизны и практической ценности работы очень аккуратно и чётко выстроил повествование в первой главе относительно структурных особенностей поверхности, перешёл к описанию электрофизических свойств и подробно остановился на современных данных о поверхностных упорядоченных структурах и представлениях об электропроводности сверхтонких плёнок, от которых провёл логическую цепочку к методам экспериментального исследования и оборудованию, при этом остановился на тонких аспектах измерения поверхностной проводимости.

Во второй и последующих главах автор искусно нанизывает крупницы исследований шаг за шагом на опорную единицу методологического анализа и укладывает всё новые и новые сведения по частицам в выбранную им методологическую схему вплоть до завершения пути и формулирования защищаемых положений и выводов, которые соискатель приводит в конце каждой главы. Следует отметить гармонию и стройность в изложении всего диссертационного материала.

#### **Соответствие полученных результатов поставленной цели и задачам**

В связи с поставленной целью работы автор во второй главе исследует поверхностные упорядоченные структуры и влияние структурных изменений на

электропроводность подложки. В соответствии с пунктом 1 поставленных автором задач соискателем отработана методика и получены результаты по поверхностной проводимости подложек кремния с различными поверхностными фазами с использованием адсорбатов Au, Na, In, Cu, Al, Ag, сделаны выводы о различном влиянии поверхностных упорядоченных структур на электрическую проводимость подложек кремния, которые приведены в конце главы.

В третьей главе автор исследует влияние дефектов на реконструированную поверхность, что также соответствует поставленной в диссертации цели, и получает ряд результатов относительно влияния экспозиции реконструированной поверхности подложек Si(100) и Si(111) на электрическую проводимость в различных газовых атмосферах, оценки стабильности поверхностных фаз различной структуры и атомов адсорбата, автор не только сделал выводы о влиянии разгонки атомов на формирование доменной поверхностной фазы, но и произвёл анализ механизмов диффузии, что позволило ему отработать методические моменты измерения электрофизических характеристик однодоменных поверхностных фаз, кроме того исследовалось влияние температуры, морфологии поверхности на проводимость. Выполненные в третьей главе исследования соответствуют задачам 2, 3, поставленным соискателем.

Решение поставленной задачи 4 осуществлено в результате исследований, которым посвящена четвёртая и пятая главы: исследовано влияние структурно-фазовых превращений в двумерных упорядоченных плёнках адсорбата на электрическую проводимость, при этом сделаны выводы о возможности прогнозирования и получения электрических характеристик вследствие управления свойствами двумерных плёнок. Автором показано, что изменение поверхностной проводимости подложки может происходить как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, что обусловлено типом адсорбируемых атомов и количественными характеристиками адсорбированного материала в субмонослойном диапазоне покрытий. Соискатель исследовал процессы роста плёнок адсорбатов Au, Sb, Al, изменения и разрушения упорядоченной структуры поверхности и их влияние на поверхностную проводимость, использовал различные значения толщины слоёв, различные по составу и структуре реконструированные поверхности кремния.

В итоге весьма внушительного объёма экспериментальных работ, сопоставления полученных данных, их анализа автор обобщает полученные результаты, делает 11 основных выводов и формулирует 7 защищаемых положений, чем и осуществляется достижение поставленной цели.

#### **Соответствие содержания диссертации содержанию и качеству опубликованных работ**

Автором опубликованы научные труды в количестве 31, оформлены два патента на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Научные статьи опубликованы в ведущих журналах Российской Федерации и за рубежом: «Физика и техника полупроводников», «Успехи физических наук», «Известия

Академии Наук. Серия физическая», «Журнал структурной химии», «Приборы и техника эксперимента», «Письма в ЖТФ», «Physics of Low-Dimensional Structures», «Applied Surface Science», «Nanotechnology» и др.. Научные труды издавались в течение 17 лет, автор последовательно ежегодно предоставлял результаты диссертационного исследования научному сообществу. Описание способов формирования наноразмерных структур и создания проводящих нанопроволок закреплено в патентах, методика измерения электрической проводимости подложек кремния зарегистрирована в виде свидетельства на программу. Содержание диссертации в полной мере отражено в научных публикациях, патентах и свидетельстве, при этом изложение материалов диссертации произведено на высоком научном уровне.

#### **Значение выводов и рекомендаций, полученных в диссертации, для науки и практики**

Исследованные Цукановым Д. А. наноструктуры на реконструированных поверхностях кремния и выводы по зависимости электрофизических свойств подложки от электрической проводимости упорядоченных слоёв адсорбатов несомненно значимы для теории физики полупроводников, а методика получения нанопроволок и сверхтонких плёнок на поверхности кремния могут быть использованы в практике разработки промышленных технологий функциональных материалов для нанoeлектроники с учётом рекомендаций соискателя, касающихся качественных и количественных характеристик наноструктур, конкретных выводов относительно влияния морфологических особенностей материалов на стабильность свойств. Особенно интересны и существенны для науки и практики данные, полученные автором диссертационного исследования, по упорядоченным системам (Au, In)/Si(111), (Au, Ag)/Si(111), (Au, Na)/Si(111), использование которых позволяет управлять электрофизическими параметрами сверхтонких слоёв, при этом автор приводит чёткие рекомендации по вариантам изменения количественного и качественного состава. Все рекомендации и выводы физически обоснованы.

#### **Степень обоснованности и достоверности каждого из полученных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В результате анализа большого объёма имеющихся литературных источников, автор произвёл необходимую выборку и синтез полученной информации, выполнил сравнения и произвёл обобщения, использовал известные апробированные методики и предложил своё оригинальное решение поставленных задач, умело используя при этом теоретические выкладки и экспериментальные данные, что в совокупности с апробацией результатов работы в научных статьях и на конференциях российского и международного уровней определяет **достоверность результатов**. Достоверность результатов определяется также и логической связью всех этапов исследования, рационально уложенных в методологические схемы.

Все основные 11 выводов сделаны в итоге кропотливого многолетнего эксперимента, результаты которого многократно были представлены для обсуждения в

докладах на конференциях Российского и международного уровней в городах: Санкт-Петербург, Владивосток, Хабаровск, Благовещенск, Новосибирск, Красноярск, Нижний Новгород, Минск, Улан-Батор, Мадрид, Токио, Нагоя, Гранада, Бад-Хоннеф, Арлингтон и др., а также изложены в более трёх десятков научных статей и запатентованы.

Сформулированные автором 7 научных положений, которые базируются на полученных выводах, имеют высокую степень обоснованности и достоверность их не вызывает сомнений.

#### **Научная новизна полученных результатов**

Впервые Цукановым Д. А. получены экспериментальные данные влиянию адсорбции фуллеренов на поверхностную проводимость Si(111), показано возможное влияние молекулярных слоёв фуллеренов как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения поверхностной проводимости в зависимости от типа атомарной составляющей поверхности.

Новые данные получены автором и в методической части, касающейся методов изменения поверхностной проводимости в бинарной системе и методов реконструкции поверхности кремния.

Детально изучены явления и процессы на наноструктурированных поверхностях Cu/Si(111), In/Si(100), Al/Si(100), Au/Si(100), Na/Si(100), и впервые соискателем описаны механизмы электрической проводимости в соответствии с исходной опорной единицей методологического анализа и пунктами ветвления в схеме «электронная структура – наноструктура объектов - морфология поверхности – образование дополнительного канала проводимости», в результате чего предложена модель системы «Подложка – поверхностная фаза».

Цуканов Д. А. полученными результатами и достигнутой целью внёс существенный вклад в новое научное направление физики наноструктур в вопросе электрического транспорта в упорядоченных поверхностях.

Представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук диссертационная работа Цуканова Д. А. несомненно представляет научный интерес, результаты её могут быть использованы в науке и на практике, работа содержит ряд научных выводов, обладающих новизной и представляющих практический интерес, но возникают и некоторые вопросы по изложению текста диссертационной работы, в связи с чем ниже приводятся замечания по диссертационной работе.

#### **Критические замечания:**

1. Некоторые общеизвестные сведения по двумерной кристаллографии можно было не приводить в первой главе диссертации, что не повлияло бы на восприятия основной научно-исследовательской части.

2. Не совсем удачно выполнены рисунки 1.4 (б) - (г), 1.12 (а), 2.16 (а), 2.24 (а), 5.21, 5.25 (а), 5.26 на страницах 25, 45, 105, 118, 256, 264, 266 соответственно: тёмный фон и мелкий шрифт затрудняют восприятие информации. Рисунки по тексту диссертации

оформлены в разных стилях, даже на одном рисунке может быть шрифт различных типов и размеров, как например, на рисунках 5.23 (а) и (б) или 5.26, 5.30 (стр. 262, 266, 271).

3. Не совсем ясно, анизотропию поверхностной проводимости в пункте 5.3 автор объясняет кристаллографическими особенностями подложки и покрытий или связывает изменение поверхностной проводимости исключительно с морфологическими особенностями поверхности.

4. В некоторых случаях единицы измерения физической величины не соответствуют названию физической величины в наименовании рисунка (рис. 5.22 на стр. 258, 5.23 (а) на стр. 262).


5. Несколько упрощённо описан химизм взаимодействия кислорода с поверхностными фазами на странице 137, но этот вопрос следует, возможно, отнести к авторам работ 401-403 из списка литературы, а не к соискателю.

Вышеуказанные замечания не уменьшают ценности изложенного в диссертации материала, диссертационная работа Цуканова Д. А. является научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно, содержащим оригинальный материал – решение важных для науки и практики задач, который обоснован и апробирован, что делает работу целостным законченным научным исследованием.

Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертационной работы.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям**

Считаю, что диссертационная работа Цуканова Дмитрия Анатольевича «Электрическая проводимость наноструктур на реконструированных поверхностях кремния» соответствует требованиям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, утверждённым Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Профессор кафедры гуманитарных и естественнонаучных дисциплин филиала федерального государственного казённого военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая академия Вооружённых Сил Российской Федерации» д.ф.-м.н., проф.  Е. С. Астапова

Подпись профессора кафедры ГиЕНД д.ф.-м.н., проф. Астаповой Е. С. заверяю зам начальника филиала ФГКВОУ ВПО «ВУНЦ СВ «Общевойсковая академия ВС РФ» по учебной и научной работе к.в.н., доцент  В. М. Рукосуев