

аттестационное дело №

дата защиты 24.01.2014 протокол № 44

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Цуканов Дмитрий Анатольевич, работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН в лаборатории технологии двумерной микроэлектроники старшим научным сотрудником, кандидат физико-математических наук.

Диссертация: «Электрическая проводимость наноструктур на реконструированных поверхностях кремния» по специальности 01.04.10 – физика полупроводников выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН в лаборатории технологии двумерной микроэлектроники.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор Зотов Андрей Вадимович работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН заведующим лабораторией технологии двумерной микроэлектроники.

Официальные оппоненты:

Астапова Елена Степановна - доктор физико-математических наук, профессор, работает в Федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Военный учебно-научный центр Сухопутных войск "Общевойсковая академия Вооружённых сил Российской Федерации"» (филиал, г. Благовещенск),

Бахтизин Рауф Загидович - доктор физико-математических наук, профессор, работает в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Башкирский государственный университет» заведующим кафедрой физической электроники и нанофизики,

Заводинский Виктор Григорьевич - доктор физико-математических наук, работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН директором института,

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Москва (заключение составлено Зайцевым-Зотовым Сергеем Владимировичем – доктором физико-

математических наук, заведующим лабораторией низкоразмерных структур атомного масштаба), дали положительные отзывы о диссертации.

На автореферат поступили отзывы от:

1. Еремеева С.В., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова Томского государственного университета.

2. Русиной Г.Г., д.ф.-м.н., старшего научного сотрудника лаборатории физики поверхностных явлений Института физики прочности и материаловедения СО РАН.

3. Чеботкевич Л.А., д.ф.-м.н., профессора кафедры физики наноструктур школы естественных наук Дальневосточного федерального университета.

4. Ланкина С.В., д.ф.-м.н., профессора кафедры общей физики Благовещенского государственного педагогического университета.

Все отзывы положительные. В отзывах на диссертацию и автореферат содержатся следующие замечания: в диссертации утверждается, что при измерении поверхностной проводимости подложек с реконструированной поверхностью необходимо учитывать анизотропию проводимости, то есть зависимость электропроводности от азимутального угла, в направлении которого пропускается ток (раздел 1.5.5); в разделе 2.2.4, посвященном исследованию электрической проводимости поверхностной фазы  $\text{Si}(100)2 \times 3\text{-Na}$ , в постановке задачи говорится, что формирование данной реконструкции сопровождается перестройкой нижележащих слоев кремния, в отличие от реконструкций  $2 \times 3$ , образуемых на поверхности  $\text{Si}(100)$  атомами  $\text{K}$ ,  $\text{Cs}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Sr}$  (стр. 93). При этом, однако, для этих реконструкций измерения поверхностной проводимости не проводились. Поэтому утверждение, что шероховатость поверхности  $\text{Si}(100)2 \times 3\text{-Na}$  приводит к уменьшению поверхностной проводимости такой подложки, не является убедительным без сравнения с результатами исследования упомянутых систем; 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; в некоторых случаях единицы измерения физической величины не соответствуют названию физической величины в наименовании рисунка (рис. 5.22 на стр. 258, 5.23(a) на стр. 262); несколько упрощенно описан химизм взаимодействия кислорода с поверхностными фазами на странице 137; можно отметить некую вольность в использовании понятия «подложка». к какому типу относится измеряемая проводимость? на многих экспериментальных графиках нарисованы погрешности, происхождение которых не описано в тексте диссертации. В ряде случаев не ясна также воспроизводимость результатов, так как в подписях к рисунку отсутствуют необходимые подробности про изучаемый образец, а в тексте про количество изученных образцов. Если рассмотреть в качестве примера поверхность  $\text{Si}(111)\text{-}7 \times 7$ , прово-

димостью которой фигурирует во многих главах диссертации, то ее величина при комнатной температуре, заявленная в качестве результатов измерения, составляет  $2 \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$  (стр. 104), в то время как в других частях диссертации можно найти значения более почти на порядок и даже более отличающиеся от заявленной величины; трудно согласиться со следующим утверждением (стр. 40): «Согласно теории, критическое покрытие всегда находится вблизи 1 для послойного роста материала (двумерный случай) [146], а для треугольной решетки значение  $\theta_c=0,5$  [147]». На самом деле точное решение континуальной задачи перколяции в двумерном случае дает  $\theta_c=0,5$ , а для решеточных моделей  $\theta_c=0,6527$ ,  $0,5$  и  $0,3473$  для шестиугольной, квадратной и треугольной решеток, соответственно (см., например, Б.И. Шкловский и А.Л. Эфрос, «Теория протекания и проводимость сильно неупорядоченных сред», УФН, 117, 401 (1975)); на стр. 55 представлены формулы 1.55 и 1.56 для систематической погрешности какой именно величины идет речь; указывается ограниченное количество низкотемпературных измерений поверхностной проводимости, которые могли бы прояснить характер проводимости наноструктур – металлический или полупроводниковый.

Основные результаты диссертации опубликованы в 31 статье в научных журналах и изданиях, из которых 27 входят в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, определенных Высшей аттестационной комиссией, а также получено 2 патента на изобретение и 1 свидетельство на программу для ЭВМ. Основные работы:

1. Tsoukanov D.A., Ryzhkov S.V., Gruznev D.V., Lifshits V.G. The role of the surface phases in surface conductivity // *Applied Surface Science*. – 2000. – V. 162-163. – P. 168–171.
2. Ryzhkov S.V., Lavrinaitis M.V., Tsukanov D.A. and Lifshits V.G. Stability and electric conductivity of Si-metal surface reconstructions during amorphous Si deposition // *Applied Surface Science*. – 2004. – V. 237. – P. 119-124.
3. Tsukanov D.A., Ryzhkova M.V., Gruznev D.V., Utas O.A., Kotlyar V.G., Zotov A.V., Saranin A.A. Self-assembly of conductive Cu nanowires on Si(111) $\sqrt{5} \times \sqrt{5}$ -Cu surface // *Nanotechnology*. – 2008. – V. 19, No. 24. - P. 245608-1 – 245608-5.
4. Gruznev D.V., Olyanich D.A., Chubenko D.N., Tsukanov D.A., Borisenko E.A., Bondarenko L.V., Ivanchenko M.V., Zotov A.V., Saranin A.A. Growth of Au thin film on Cu-modified Si(111) surface // *Surface Science*. - 2009. - V. 603. - P. 3400-3403.
5. Tsukanov D.A., Ryzhkova M.V., Borisenko E.A., Bondarenko L.V., Matetskiy A.V., Gruznev D.V., Zotov A.V., Saranin A.A. Effect of C60 layer on the growth mode and conductance of Au and Ag films on Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au and Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surfaces // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – V. 110, No. 9. – P. 093704-1 – 093704-5.
6. Цуканов Д.А., Рыжкова М.В., Борисенко Е.А. Влияние стехиометрического состава поверхностной фазы Si(111) $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Au,Ag) на электрическую проводимость подложки // *Физика и техника полупроводников*. – 2013. – Т. 47, № 6. – С.765-771.

Патенты, свидетельства:

1. Патент на изобретение № 2359356 от 20.06.2009. Способ создания проводящих нанопроволок на поверхности полупроводниковых подложек // Зотов А.В., Грузнев Д.В., Цуканов Д.А., Рыжкова М.В., Коробцов В.В., Саранин А.А.

2. Патент на изобретение № 2475884 от 20.02.2013. Способ формирования наноразмерных структур на поверхности полупроводников для использования в микроэлектронике // Саранин А.А., Зотов А.В., Грузнев Д.В., Цуканов Д.А., Бондаренко Л.В., Матецкий А.В.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- экспериментально установлено влияние поверхностных фаз в субмонослойных системах Au/Si(100), Al/Si(100), Na/Si(100), In/Si(100), Cu/Si(111) на электрическую проводимость образцов кремния.

- установлено влияние адсорбции атомов золота, алюминия, сурьмы, кремния, а также экспозиции в кислороде и атомарном водороде на электрическую проводимость реконструированной поверхности образцов кремния Si(100) и Si(111) при комнатной температуре в сверхвысоком вакууме.

- обнаружено увеличение электрической проводимости реконструированной поверхности кремния Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au при адсорбции малых количеств индия (0,7-0,8 МС), серебра (0,01-0,02 МС) или натрия (0,07-0,09 МС).

- предложен метод управления поверхностной проводимостью с помощью модификации субмонослойной бинарной системы Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Au,Ag) путём изменения соотношения количеств золота и серебра в данной фазе с сохранением суммарного покрытия адсорбатов (1,1-1,2 МС).

- изучено влияние адсорбции фуллеренов на поверхностную проводимость подложки Si(111). Установлено, что молекулярные слои фуллеренов оказывают влияние на электрический заряд поверхностного слоя, что приводит в случае поверхности C60/Si(111)7 $\times$ 7 и C60/Si(111)3 $\times$ 1-Na к повышению поверхностной проводимости, а в случае с C60/Si(111)5 $\times$ 2-Au – к уменьшению поверхностной проводимости.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в ходе работы было доказано, что:

- реконструированная поверхность подложки представляет дополнительный канал проводимости, свойства которого определяются структурным качеством кристаллической решётки, электронной структурой, а также морфологией поверхности;

- установлена корреляция поверхностной проводимости с упорядочением/разупорядочением кристаллической структуры поверхности;

- для адсорбированных атомов золота, серебра и натрия молекулы фуллеренов являются акцепторами заряда, из-за чего меняется влияние адсорбированных атомов на по-

верхностную проводимость реконструированного слоя.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что исследуемые наноструктуры могут служить основой для разработки функциональных материалов для наноэлектроники. Комплексный подход к экспериментальному исследованию и анализу проводимости упорядоченных реконструкций и наноструктур на поверхности кремния демонстрирует новые возможности для создания приборных структур на их основе.

Достоверность экспериментальных результатов подтверждается высокой воспроизводимостью и хорошим согласованием с известными экспериментальными результатами.

Личный вклад соискателя состоит в участии на всех этапах исследовательского процесса, в подготовке и проведении экспериментов, в интерпретации полученных результатов, подготовке и оформлении публикаций по выполненной работе. Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается основной идеей о возможности создания сверхтонких проводящих пленок на реконструированных поверхностях кремния и реконструкций поверхности кремния с уникальными свойствами, наличием последовательного плана исследований и конкретно определенных исследуемых физических объектов.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физики полупроводников, соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, и принял решение присудить Цуканову Д.А. ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

При проведении тайного голосования диссертационного совета в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель  
диссертационного совета, академик

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ю.Н. Кульчин

Е.Л. Гамаюнов

24.01.2014