



«Утверждаю»

Директор ИФП им. В. А. Котельникова РАН

академик

Ю. В. Гуляев

«18» декабря 2013 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию ЦУКАНОВА Дмитрия Анатольевича на тему: «Электрическая проводимость наноструктур на реконструированных поверхностях кремния», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности - 01.04.10 «физика полупроводников»

До недавнего времени наиболее распространенными объектами исследования, в которых реализуется двумерный электронный газ, были структуры типа полевого транзистора и гетероструктуры. Характерная толщина области локализации электронного газа в этих структурах составляет десятки нанометров. Однако в последние годы постепенно возрастает интерес и к структурам, имеющим толщину порядка атомной. К таким структурам относятся отщепленные чешуйки одноатомной толщины слоистых материалов, таких как графен,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{FeSe}$ , а также атомные поверхностные структуры, формирующиеся в условиях сверхвысокого вакуума на атомарно чистых поверхностях полупроводников, в том числе под воздействием адсорбатов. Интерес к физическим свойствам объектов нанометрового масштаба размеров связан также и с преодолением промышленными технологиями 100 нм рубежа и постепенным приближением к 10 нм размерам, а также и с обнаружением необычных физических свойств у слоев моноатомной толщины. Наиболее хорошо известным примером является графен — одноатомный слой графита, электронные свойства которого принципиально отличаются от свойств трехмерных кристаллов. Не менее интересными объектами являются упорядоченные наноструктуры на поверхности полупроводников, которые формируются методом самоорганизации. Как справедливо отмечается в диссертации, таких структур только на поверхности кремния известно более трех сотен. Однако электрофизические свойства поверхностных фаз до сих пор исследованы достаточно слабо, что связано прежде всего с трудностями их экспериментального изучения — необходимостью использования сверхвысоковакуумных технологий и методик, чувствительных к поверхности. В то же время, уже изученные к настоящему времени поверхностные структуры демонстрируют широчайший спектр физических свойств: от сверхпроводимости до волн зарядовой плотности и жидкости Латтинджера. Таким образом,

актуальность выбранного направления исследований – изучение электрической проводимости реконструированной поверхности кремния и наноструктур на модифицированной поверхности — не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 338 страниц, включая 131 рисунок и список литературы из 657 наименований.

**Во введении** приводится общая характеристика диссертации, где дается обоснование актуальности исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту, а также отражаются научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава диссертации** — подробнейший обзор методических вопросов, относящихся к тематике диссертации. В нем дается описание основных понятий физики поверхности, а также описаны различные методы исследования поверхности, в том числе подробно рассматриваются различные методики измерения проводимости поверхности.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным исследованиям электрической проводимости упорядоченных поверхностных структур на подложках кремния Si(100) и Si(111). Глава содержит два раздела. В первом разделе обсуждается влияние поверхностных реконструкций, сформированных осаждением атомов адсорбатов, на электропроводность подложки Si(100), а во втором — на электропроводность подложки Si(111). Представлены результаты исследования атомарно-чистой поверхности Si(100) $2\times 1$ , а также поверхностных фаз Si(100)-Au, Si(100)-Al, Si(100) $2\times 3$ -Na, Si(100) $4\times 3$ -In, атомарно-чистой поверхности кремния Si(111), поверхностных фаз Si(111) $5,55\times 5,55$ -Cu, Au/Si(111), Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag и In/Si(111). В конце каждого раздела подводятся итоги исследования, а в конце главы приводится заключение.

**Третья глава** посвящена изучению влияния дефектов на электропроводность реконструированной поверхности. В ней представлены результаты изучения проводимости поверхностных фаз при наличии различных дефектов на поверхности, которые формировались адсорбцией чужеродных атомов, изменением кристаллической структуры, а также возникали при формировании островков и изменении морфологии поверхности. Изучено влияние адсорбции молекулярного кислорода и/или атомарного водорода на проводимость поверхностей Si(100) $2\times 1$ , Si(111) $7\times 7$  и Si(111) $5,55\times 5,55$ -Cu, Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au, Si(100) $2\times 3$ -Na, а также осаждения кремния на реконструированные поверхности Si(100) $4\times 3$ -

In, Si(100) $2 \times 3$ -Na и Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In. Изучено также влияние доменных границ на поверхностную проводимость однодоменных поверхностных фаз Si(111) $5 \times 2$ -Au, Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au, Si(111)-h- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Au,In). Изучено влияние шероховатости подложки на поверхностную проводимость.

В **четвертой главе** рассмотрены способы модификации электрической проводимости поверхностных структур, что является важным шагом к практическому использованию поверхностных фаз. В частности, в этой главе представлены результаты изучения проводимости трехкомпонентных поверхностных фаз в системах (Au,In)/Si(111), Si(111) $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Au,Ag), Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au + Na, изучено влияние фазовых переходов на поверхностную проводимость в системах Si(111) $4 \times 1$ -In — Si(111) $4 \times 2$ -(In,Na), Si(111)- $\beta$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au — Si(111) $6 \times 6$ -(Au,Ag) и субмонослойной системе (Au,Ag)/Si(111).

В **пятой главе** изложены результаты изучения электрической проводимости наноструктур на поверхности кремния – сверхтонких плёнок и нанопроволок. В первом разделе описаны результаты исследования электрической проводимости сверхтонких плёнок адсорбата, осаждённых при комнатной температуре на реконструированную поверхность кремния Si(100). Во втором разделе демонстрируется, что поверхностные реконструкции могут по-разному влиять на механизмы роста плёнок, а, следовательно, и определять электрические свойства таких плёнок. В качестве примера приводятся результаты изучения морфологии и проводимости плёнок золота, осаждённых на реконструкциях In/Si(111): Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In, Si(111) $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$ -In, Si(111) $4 \times 1$ -In и Si(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In и Si(111) $5,55 \times 5,55$ -Cu. Изучена также зависимость поверхностной проводимости системы Au/Si(111) $5,55 \times 5,55$ -Cu при различных покрытиях золота от величины экспозиции образцов в кислороде. Исследована электропроводность нанопроволок меди, сформированных на поверхности Si(111) $5,55 \times 5,55$ -Cu. В последнем разделе пятой главы продемонстрировано влияние молекул фуллеренов C<sub>60</sub> на проводимость реконструированной поверхности Si(111). Установлено, что фуллерены, действуя в качестве акцептора электрического заряда, изменяют поверхностную проводимость подложки. Установлено также, что слой фуллеренов при адсорбции на него сверху атомов золота, серебра или натрия сдвигает их влияние на свойства поверхности в области более высоких покрытий. Показано, что адсорбция натрия на поверхность фуллереновой плёнки приводит к формированию сверхтонкой плёнки фуллерида Na<sub>x</sub>C<sub>60</sub>.

В **заключении** приведены основные результаты работы. Кроме того, каждая глава диссертации сопровождается кратким введением и заключением.

Из представленного выше краткого описания содержания диссертационной работы

видно, что в ней представлены результаты весьма обширного многолетнего исследования электрофизических свойств самых разнообразных поверхностных структур. Эти исследования диссертант начал в конце 90-х годов прошлого столетия, почти в то же время, что и за рубежом, что и определило новизну результатов. В этих исследованиях затронуты различные аспекты данной задачи, от анализа относительных вкладов подложки, области обедненного заряда и самой поверхностной структуры до влияния центров рассеяния, шероховатости, межзеренных и междоменных границ и легирования на проводимость, что определяет их научную и практическую значимость. Возможность столь широкого охвата различных аспектов проводимости поверхностных структур связана со сравнительно простой методикой измерений, разработанной автором, и проведением подавляющей части исследований при комнатной температуре. С этим связана также и одна из трудностей в интерпретации результатов — зачастую автор вынужден выделять сравнительно малый вклад проводимости поверхностных структур на фоне сравнительно больших шунтирующих вкладов со стороны объема и поверхностного слоя. В ряде случаев подобные проблемы могут быть решены с помощью понижения температуры. С другой стороны, для практических целей представляет интерес именно изучение проводимости при комнатной температуре, что в значительной мере оправдывает проведение значительной части измерений именно при таких условиях.

Результаты исследований, проведенных Д. А. Цукановым, представляют несомненный научный и практический интерес. Полученные в работе результаты рекомендуются к использованию в следующих организациях: МГУ им. М. В. Ломоносова, ФИАН им. П. Н. Лебедева, ИОФ РАН, ИАПУ ДВО РАН, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, ИФМ РАН (Нижний Новгород), ИФП СО РАН (Новосибирск), ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН и в других институтах РАН и Министерства образования и науки.

Диссертация написана весьма хорошим языком и, несмотря на очень большой объем, содержит лишь незначительное количество неточностей и опечаток. Вместе с тем, по диссертации можно высказать ряд замечаний:

1. 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 Si(111)-7x7, проводимость 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:  $1,2 \times 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}/\square$  (стр. 113, рис. 2.22(а),(б)),  $5,5 \times 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$  (рис. 3.2 стр. 136),  $10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$  (рис. 3.11 стр. 155),  $2,8 \pm 1,4 \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$ ,  $0,6 \pm 0,1 \times 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$  (таблица 4.1 стр. 199 и 4.2 стр. 217),  $4 \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} / \square$  (рис. 5.14 на стр. 247 и 5,15 на стр. 248),  $(1,2 \pm 0,1) \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$  (стр. 252).

2. 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 решётки 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)).
3. На стр 55 представлены формулы 1.55.и 1.56 для систематической погрешности  $\delta$ , однако нет пояснений, о систематической погрешности какой именно величины идет речь, откуда взялись эти формулы и зачем они нужны, так как в последующем тексте нет ссылок на эти формулы.
4. На стр. 66 при обсуждении четырехконтактного метода измерения проводимости автор делает следующее утверждение: «Другая особенность использования данного метода – необходимо обеспечить хороший контакт токовых электродов. Несоблюдение данного условия нарушит условие эквипотенциальности токовых линий, и соответственно, приведёт к большой погрешности измерений [152].» С этим утверждением трудно согласиться, так как электрический ток течет в направлении градиента электрохимического потенциала, а не по эквипотенциальным линиям.
5. Анализ, относящийся к рис. 2.18 (стр. 107) был бы гораздо более убедительным, если бы автор вычел вольт-амперные характеристики друг из друга и продемонстрировал близкое к линейному поведению этой разности.

Отмеченные замечания не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. В целом, исследование Д. А. Цуканова удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика

полупроводников.

Доклад Д. А. Цуканова заслушан на научном семинаре лаборатории низкоразмерных атомных структур 19 ноября 2013 г. Отзыв подготовлен зав. лабораторией д.ф.-м.н. С. В. Зайцевым-Зотовым

Зав. лабораторией низкоразмерных атомных структур

ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

д.ф.-м.н.



С. В. Зайцев-Зотов