

На правах рукописи

ЦУКАНОВ Дмитрий Анатольевич

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ НАНОСТРУКТУР  
НА РЕКОНСТРУИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КРЕМНИЯ**

Специальность - 01.04.10

Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук



Владивосток 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Российская Федерация

Научный консультант - доктор физико-математических наук, профессор  
**Зотов Андрей Владимович**

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук, профессор  
**Бахтизин Рауф Загидович**  
(Башкирский государственный университет, г. Уфа)  
доктор физико-математических наук, профессор  
**Астапова Елена Степановна**  
(ФГКВООУ ВПО Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая академия Вооружённых Сил Российской Федерации» (филиал), г. Благовещенск)  
доктор физико-математических наук, профессор  
**Заводинский Виктор Григорьевич**  
(Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск)

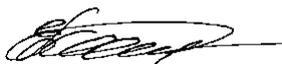
Ведущая организация **Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Москва**

Защита состоится "24" января 2014 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: г. Владивосток, ул. Радио, д. 5, ауд. 510.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5.

Автореферат разослан "30" ноября 2013 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Гамаюнов Е.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

**Актуальность работы.** В настоящее время прогресс в области микроэлектроники связан, главным образом, с повышением степени интеграции микросхем (в соответствии с законом Мура [1]). В 2011 году характерный размер транзисторов составлял 32 нм, в 2014 году предполагается, что он составит уже 22 нм, а после 2015 года ожидается очередной скачок - до 12 нм [2,3]. При этом очевидно, что размеры элементов интегральных схем фактически достигли своего физического предела [4]. Дело в том, что дальнейшее уменьшение линейных размеров полупроводниковых приборов приведёт к тому, что механизмы транспорта носителей заряда в них будут существенно отличаться от классических представлений, характерных для объемного материала. Особенно это характерно для наноэлектроники, которая использует квантово-размерные объекты для построения полупроводниковых приборов нанометрического масштаба.

Среди наиболее возможных кандидатов для построения таких квантово-размерных систем особо выделяются упорядоченные наноструктуры на поверхности полупроводников, которые формируются методом самоорганизации в определённом диапазоне температур и концентраций вещества [5,6]. Метод самоорганизации позволяет получать упорядоченные массивы нанообъектов на значительных площадях поверхности. При этом упорядоченные структуры на таких подложках могут служить как для управления механизмами роста нанообъектов, так и непосредственно в качестве структурных элементов полупроводниковых приборов.

Таких структур – атомных реконструкций (или поверхностных фаз) – только на кремнии известно более 300 [5], причем в последнее время они являются предметом интенсивных исследований с точки зрения их атомной и электронной структуры. В то же время электрофизические свойства поверхностных фаз до сих пор исследованы достаточно слабо. В первую очередь это связано с тем, что исследования проводятся на монокристаллической подложке, линейные размеры которой существенно превышают размеры исследуемых объектов, поэтому для их изучения требуются методы, очень чувствительные к изменениям на поверхности. Во вторую очередь накладывается требование проводить измерения в условиях сверхвысокого вакуума, чтобы избежать неконтролируемых загрязнений таких структур чужеродными веществами после формирования поверхностных фаз на подложке.

Изучение структуры и свойств поверхностных фаз на кремнии представляет собой непростую экспериментальную задачу. Наиболее распространённым методом изучения поверхностных фаз является исследование корреляции их свойств с атомарной и кристаллической структурой [7,8]. Этот метод используется и для исследования электронной структуры поверхностных фаз с помощью

ультрафиолетовой и рентгеновской спектроскопии, причем как расчётные, так и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что поверхностные фазы, подобно объёмным материалам, можно условно отнести к металлическим или полупроводниковым (изолирующим) [8]. Такое разделение основывается на данных исследований зонной структуры поверхностных состояний. Так, например, поверхности  $\text{Si}(100)2 \times 1$ ,  $\text{Si}(111)1 \times 1\text{-As}$  и бездефектная поверхность  $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-In}$  обладают полупроводниковыми свойствами, а поверхности  $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-In}$  и  $\text{Si}(111)7 \times 7$  – металлическими [6]. Последний пример является особенно показательным, так как металлическими свойствами обладает атомарно-чистая поверхность кристалла полупроводника. С другой стороны, присутствие электронных поверхностных состояний на поверхности полупроводника возмущает электронную структуру в объёме полупроводникового материала, приводя к изгибу зон в приповерхностной области подложки [8]. При этом область пространственного заряда вблизи поверхности может представлять либо обеднённый носителями заряда, либо обогащённый, либо инверсный слой в зависимости от состояния поверхности. Всё это, в принципе, позволяет получить целую гамму электрофизических свойств поверхности кремниевого кристалла, что расширяет возможности использования поверхностных структур в полупроводниковых технологиях.

Такое разнообразие свойств поверхности полупроводников способствует повышенному интересу исследователей к изучению их электрофизических параметров, в том числе и электрической проводимости. Связь между структурными превращениями и изменением поверхностной проводимости была обнаружена ещё в 70-х годах прошлого века [9]. К настоящему моменту принято считать, что электропроводность поверхностных фаз в действительности может представлять собой сумму трёх основных вкладов [10]. Это вклады проводимости зоны поверхностных состояний, слоя пространственного заряда приповерхностной области подложки, а также проводимости самого слоя адсорбата при покрытии выше некоторого критического значения. Фактически, поверхностные фазы, с точки зрения их проводящих свойств, являются дополнительными к "объёму" каналами проводимости на кремнии [11]. При этом необходимо учитывать, что на проводимость поверхности кристалла сильное влияние оказывает присутствие дефектов на поверхности. Атомные ступени и дефекты кристаллической решётки могут действовать как барьеры для носителей заряда, что, например, подтверждается наблюдениями осцилляций Фриделя вблизи ступеней и дефектов [12]. Следует отметить, что изучение электрических свойств поверхностных фаз может само по себе служить еще одним методом исследований различных процессов на поверхности, таких как механизмы формирования поверхностных фаз и различных структур на кремнии, процессов адсорбции, агломерации и т.п. За последние 10-15 лет уже

накопилось определённое количество данных по измерению электрической проводимости поверхностных упорядоченных структур и наноструктур (сверхтонких плёнок, нанопроволок), которые нуждаются в обобщении и систематизации [13,14].

Всё вышесказанное определило актуальность выбранного направления исследований – изучение электрической проводимости реконструированной поверхности кремния и наноструктур на модифицированной поверхности.

**Целью диссертационной работы** является исследование электрической проводимости наноструктур и сверхтонких плёнок адсорбатов на подложках кремния Si(100) и Si(111) с реконструированной поверхностью и определение влияния поверхностных реконструкций и наноструктур на электрические свойства приповерхностной области подложек.

**Для достижения цели работы ставятся следующие задачи:**

1. С помощью четырёхзондового метода в условиях сверхвысокого вакуума отработать методику измерений электрической проводимости подложек кремния с поверхностными фазами и наноструктурами.
2. Провести экспериментальные исследования электрической проводимости поверхности кремния Si(100) и Si(111) с поверхностными фазами и наноструктурами. Показать влияние поверхностных фаз и наноструктур на электрические свойства подложки.
3. Установить влияние дефектов кристаллической структуры поверхностных фаз, а также морфологии поверхности на электрическую проводимость приповерхностной области подложки.
4. Исследовать влияние структурно-фазовых превращений в двумерных упорядоченных плёнках адсорбата на электрическую проводимость. Показать возможности управления свойствами двумерных плёнок для достижения требуемых параметров электропроводности.

**Научная новизна работы** заключается в создании нового направления в области физики наноструктур, связанного с изучением электрического транспорта в упорядоченных реконструкциях на поверхности кремния, а также наноструктур, сформированных на такой поверхности. Предложено рассматривать поверхностные фазы на кремнии как каналы проводимости, в которых электрический ток протекает в направлении, параллельном поверхности подложки. В работе получены новые экспериментальные результаты, основными из которых являются следующие:

1. 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 подложки кремния. Предложена модель системы подложка-поверхностная фаза, в которой поверхностная фаза представляет на поверхности подложки дополнительный канал проводимости, свойства которого определяются структурным качеством кристаллической решётки, электронной структурой, а также морфологией поверхности.

2. Установлено влияние адсорбции атомов золота, алюминия, сурьмы, кремния, а также экспозиции в кислороде и атомарном водороде на электрическую проводимость реконструированной поверхности подложек кремния Si(100) и Si(111) при комнатной температуре в сверхвысоком вакууме. Показана корреляция поверхностной проводимости с упорядочением/разупорядочением кристаллической структуры поверхности.
3. 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).
4. Предложен способ модификации поверхностной проводимости в субмонослойной бинарной системе 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).
5. 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 C<sub>60</sub>/Si(111)7×7 и C<sub>60</sub>/Si(111)3×1-Na к повышению поверхностной проводимости, а в случае с C<sub>60</sub>/Si(111)5×2-Au – к уменьшению поверхностной проводимости. Кроме того, было показано, что для адсорбированных атомов золота, серебра и натрия молекулы фуллеренов являются акцепторами заряда, из-за чего меняется влияние адсорбированных атомов на поверхностную проводимость реконструированного слоя.

**Практическая ценность работы** состоит в том, 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.

В данной работе измерена электрическая проводимость упорядоченных слоёв адсорбатов на подложке кремния, определено их влияние на электрофизические свойства подложки, сформированы наноструктуры на поверхности кремния: сверхтонкие плёнки и нанопроволоки – и измерена их электропроводность.

Установлено, что свойства данных структур существенно отличаются от свойств объёмного материала. Было показано, что нанопроволоки меди на поверхности Si(111) обладают наиболее низким удельным сопротивлением по сравнению с известными нанопроволоками на основе силицидов металлов. К тому же в процессе самоорганизации таких нанопроволок, используя соответствующую морфологию поверхности образца, возможно формирование проводящих каналов в виде колец, петель т.п. Сверхтонкие плёнки золота, сформированные на поверхности Si(111)5,55×5,55-Cu, демонстрируют более высокие значения проводимости из-за «сглаженной» морфологии поверхности за счёт подавления формирования объёмного силицида, в отличие от плёнки меди на атомарно-чистой поверхности Si(111)7×7. Упорядоченный слой Si(111)5,55×5,55-Cu может служить каналом проводимости в полупроводниковых элементах на основе кремния, а при осаждении на него плёнки золота с покрытием выше 3 МС такие слои демонстрируют хорошую стабильность при выдержке в атмосфере кислорода. Подобные системы имеют высокую практическую ценность и могут быть использованы при разработке токопроводящих элементов нанометрового масштаба.

Бинарные упорядоченные системы (Au,Ag)/Si(111), (Au,In)/Si(111) и (Au,Na)/Si(111) демонстрируют возможности управления электрическими параметрами сверхтонких слоёв путём изменения концентрации атомов и их стехиометрического состава. Так, было показано, что адсорбция натрия в количестве 0,07-0,09 МС на поверхность Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au при температуре подложки 350°C приводит к резкому повышению электрической проводимости, а дальнейшее напыление натрия при комнатной температуре в зависимости от концентрации натрия уменьшает проводимость данной фазы вплоть до значения, соответствующего исходной подложке. Кроме того, свойства упорядоченных слоёв можно изменять, управляя морфологией поверхности, плотностью линейных дефектов (например, антифазных доменных границ), концентрацией адсорбированных атомов. Такие свойства также могут найти практическое применение.

### **Основные защищаемые положения**

1. Формирование упорядоченных поверхностных реконструкций (поверхностных фаз) Au/Si(100), Si(100)c(4×12)-Al, Au/Si(111), Si(111)4×1-In, Si(111) $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In, Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag и Si(111)5,55×5,55-Cu приводит к увеличению поверхностной проводимости образца по сравнению с атомарно-чистыми поверхностями Si(100)2×1 и Si(111)7×7, соответственно. Поверхностные фазы Si(100)4×3-In, Si(100)2×2-Al не изменяют поверхностную проводимость, а поверхностная фаза Si(100)2×3-Na уменьшает поверхностную проводимость образца. Такое влияние

поверхностных фаз на свойства подложки связано с изменениями пространственного заряда в приповерхностной области подложки и (или) природой (металлической или полупроводниковой) поверхностных состояний, а также определяется анизотропией кристаллической структуры и морфологией поверхности.

2. На начальной стадии адсорбции атомарного водорода, кислорода, атомов золота, сурьмы, алюминия на поверхность  $\text{Si}(100)2 \times 1$  при комнатной температуре наблюдается уменьшение поверхностной проводимости образца, которое коррелирует с уменьшением интенсивности рефлексов ДМЭ исходной поверхности. Адсорбция кремния на поверхностные реконструкции приводит к уменьшению проводимости лишь в случае поверхности  $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-In}$ , когда атомы кремния не входят в состав поверхностной фазы.
3. Морфология поверхности подложки оказывает влияние на электрическую проводимость реконструированной поверхности. Поверхностная проводимость однодоменной поверхностной фазы  $\text{Si}(111)5 \times 2\text{-Au}$  выше, чем для трёхдоменной. Формирование островков индия на поверхностной фазе  $\text{Si}(100)c(4 \times 12)\text{-Al}$  приводит к уменьшению её поверхностной проводимости. Шероховатость поверхности  $\text{Na/Si}(100)$ , возникшая вследствие массопереноса кремния в процессе формирования поверхностной фазы  $\text{Si}(100)2 \times 3\text{-Na}$ , уменьшает поверхностную проводимость подложки по сравнению с атомарно-чистой поверхностью  $\text{Si}(100)2 \times 1$ .
4. Удаление антифазных доменных границ реконструированной поверхности  $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$  при адсорбции индия или натрия приводит к увеличению поверхностной проводимости подложки. Данное повышение проводимости связано с увеличением плотности состояний в поверхностной зоне  $S_1$ , причём эффект повышения проводимости выше при адсорбции натрия на  $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$  при температуре  $350^\circ\text{C}$ , чем при адсорбции индия. Адсорбция натрия на поверхность  $\text{Si}(111)\text{-}h\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-(Au,Na)}$  при комнатной температуре приводит к исчезновению зоны поверхностных состояний  $S_1$  и, соответственно, уменьшению поверхностной проводимости.
5. Изменение стехиометрического состава поверхностной фазы  $\text{Si}(111)\sqrt{21} \times \sqrt{21}\text{-(Au,Ag)}$  отражается на поверхностной проводимости образца. При увеличении концентрации золота в данной поверхностной фазе и, соответственно, уменьшении концентрации серебра, поверхностная проводимость увеличивается из-за возрастающего влияния слоя пространственного заряда в приповерхностной области подложки на результаты измерений.
6. Адсорбция меди и золота при комнатной температуре на поверхность  $\text{Si}(111)5,55 \times 5,55\text{-Cu}$  приводит к формированию наноструктур с повышенной

проводимостью по сравнению с адсорбцией на чистую поверхность Si(111)7×7. При этом, нанопроволоки, формирующиеся при адсорбции 15 МС меди на поверхность Si(111)5,55×5,55-Cu при комнатной температуре, демонстрируют наиболее высокую анизотропию поверхностной проводимости ( $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}=4,8$ ). Адсорбция более 4 МС золота на реконструкцию Si(111)5,55×5,55-Cu при комнатной температуре приводит к формированию неупорядоченной плёнки с проводимостью более высокой, чем после адсорбции такого же количества золота на поверхность Si(111)7×7.

7. Слои фуллеренов C<sub>60</sub> (1-2 МС), предварительно осаждённые на реконструированные поверхности Si(111)-α-√3×√3-Au и Si(111)√3×√3-Ag, исполняют роль акцепторов для адсорбированных атомов золота и серебра, соответственно. При этом, атомы золота и серебра проникают через упорядоченные слои фуллеренов и взаимодействуют с поверхностной реконструкцией под ними: в случае с фазой золота слой объёмного заряда не изменяет свои свойства, а в случае серебра пик проводимости, соответствующий максимальной плотности состояний в зоне S<sub>1</sub>, смещается в область более высоких покрытий (~0,5 МС).

**Научная обоснованность и достоверность** представленных в диссертационной работе экспериментальных результатов определяется корректностью постановки решаемых задач и их физической обоснованностью, применением взаимодополняющих методов исследования поверхности, а также соответствием полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными.

**Апробация результатов работы** Основные результаты работы докладывались на международных, российских и региональных конференциях, в том числе:

III, V, VII, IX Российско-Японском (RJSSS, г. Владивосток) и IV, VI, VIII, X Японско-Российском (JRSSS, университеты г. Нагоя, г. Тояма, г. Сендай, г. Токио Япония) семинарах по поверхностям полупроводников (1998-2012 гг.); Международной конференции по атомарно-контролируемым поверхностям, границам раздела и наноструктурам (ACSIN-5, Экс-ан-Прованс, Франция, 6-9 июля 1999 г.; ACSIN-7, Нара, Япония, 16-20 ноября 2003 г.; ACSIN-10, Гранада, Испания, 21-25 сентября 2009 г.); Всероссийской конференции «Нанопотоника» (Нижний Новгород, 20-25 марта 2000 г.); Азиатско-Тихоокеанской конференции по фундаментальным проблемам опто- и микроэлектроники (Владивосток, 11-15 сентября 2000 г. и 30 сентября – 4 октября 2002 г.); Международном семинаре по двумерной проводимости

поверхностных состояний и монослоев WE-Heraeus-Seminar “2D Conductivity in Surface States and Monolayers” (Бад-Хоннеф, Германия, 5-8 марта 2001 г.) (приглашенный доклад); Международной конференции Nanomeeting (Минск, Беларусь 22-25 мая 2001 г. и 28-31 мая 2013 г.), III международной конференции по физике низкоразмерных структур (PLDS-3, Черноголовка, 15-20 октября 2001 г.); Третьей Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (СПбГУ, Санкт-Петербург, 5-8 декабря 2001 г.); I, II, III, IV, VI, VII, VIII, IX, X конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов (ПДММ-1997, ПДММ-1998, ПДММ-1999, ПДММ-2000, ПДММ-2002, ПДММ-2003, ПДММ-2004, ПДММ-2005, ПДММ-2006) (ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток); Региональной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике (ДВГУ, г. Владивосток, 1998, 1999, 2002 гг.); Региональной научной конференции «ФИЗИКА: Фундаментальные и прикладные исследования, образование» (ТОГУ, Хабаровск, 2001 г.; АмГУ, Благовещенск, 2002 г.; ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, 2003 г.; АмГУ, Благовещенск, 2006 г.; ДВГУ, Владивосток, 2007 г.; ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, 2011, АмГУ, Благовещенск, 2012 г.); Второй Всероссийской конференции «Химия поверхности и нанотехнология» (23-28 сентября 2002 г., Санкт-Петербург-Хилово, Псковская обл., Россия); Международном симпозиуме «Принципы и процессы создания неорганических материалов» (Самсоновские чтения) (4-6 ноября 2002 г. и 12-15 апреля 2006 г., Хабаровск); IV Международной научно-технической конференции “Электроника и информатика - 2002” (МИЭТ, Зеленоград, 19-21 ноября 2002 г.); 2-й монгольской конференции по фотоэлектрике (2nd MOPVC, Улан-Батор, Монголия, 4-6 сентября 2003 г.); 9-й Международной конференции по формированию межфазных границ в полупроводниках (ICFSI-9, Мадрид, Испания, 15-19 сентября 2003 г.); I и III Российском совещании по росту кристаллов и плёнок кремния и исследованию их физических свойств и структурного совершенства (Кремний-2004, Иркутск, 5-9 июля 2004 г. Кремний-2006, г. Красноярск, 4-6 июля 2006 г., Кремний-2012, Санкт-Петербург, 9-13 июля 2012 г.); 15-м, 16-м, 19-м и 20-м Международном симпозиуме «Наноструктуры: физика и технология» (Новосибирск, 25-29 июня 2007 г.; Владивосток, 14-18 июля 2008 г.; Екатеринбург, 20-25 июня 2011 г., Нижний Новгород, 24-30 июня 2012 г.), Международной конференции «Наноэлектронные устройства для обороны и безопасности» (NANO-DDS, Арлингтон, США, 18-21 июня 2007 г.), XIII и XVII Международных симпозиумах "Нанофизика и наноэлектроника" (Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 16-20 марта 2009 г., 11-15 марта 2013 г.), Азиатской школе-конференции по физике и технологии наноструктурированных материалов (ASCO-NANOMAT) (Владивосток, 21-28 августа

2011 г.), 6-м Международном симпозиуме по науке о поверхности (ISSS-6, Токио, Япония, 11-15 декабря 2011 г.).

**Личный вклад автора диссертации** заключается в планировании и выполнении всех экспериментальных исследований электрической проводимости реконструированной поверхности подложек кремния Si(100) и Si(111) в сверхвысоком вакууме. Измерения проводились как лично автором, так и с его непосредственным участием в соавторстве с Рыжковым С.В., Утасом О.А., Рыжковой М.В., Бондаренко Л.В., Белоусом И.А. Исследования морфологии и структуры поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии проводились в соавторстве с А.А. Сараниным, А.В. Зотовым, Д.В. Грузневым, В.Г. Котляром. Автором предложен и разработан метод измерения поверхностной проводимости подложек кремния с реконструированной поверхностью и наноструктурами, выполнен анализ экспериментальных исследований, получены новые результаты, имеющие научную и практическую значимость.

**Публикации** По теме диссертации опубликовано 27 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК, 2 патента РФ, 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации** 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.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**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.

**В первой главе** рассматриваются некоторые юридические вопросы, касающиеся настоящего исследования. В первом разделе рассмотрены основные вопросы и понятия, касающиеся двумерной кристаллографии поверхности полупроводников, а также приведены некоторые примеры элементарных наноструктур на поверхности кремния и их свойства. Во втором разделе указаны общие сведения об электропроводности полупроводников, а также современные представления об

электропроводности сверхтонких пленок и поверхностных упорядоченных структур. В третьем разделе приведены описания экспериментальных методов исследования, таких как дифракция медленных электронов, сканирующая туннельная микроскопия, четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления полупроводниковых подложек, адаптированный к измерениям в условиях сверхвысокого вакуума. В четвёртом разделе представлены основные способы измерения поверхностной проводимости, показано влияние подложки на результаты измерений.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным исследованиям электрической проводимости упорядоченных поверхностных структур на подложках кремния Si(100) и Si(111).

В первом разделе обсуждается влияние поверхностных реконструкций, сформированных осаждением атомов адсорбатов на поверхность Si(100), на электропроводность подложки. Упорядоченные поверхностные структуры на поверхности кремния (поверхностные фазы) рассматриваются как каналы проводимости на объемной подложке, электрический транспорт в которых осуществляется вдоль (параллельно) поверхности. Экспериментальным путём было установлено, что формирование упорядоченных структур, сформированных атомами адсорбата, приводит к изменению электрической проводимости подложки  $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0$ , где  $\sigma_0$  - проводимость атомарно-чистой подложки кремния. Причем эти изменения коррелируют как со стехиометрическим составом поверхностных фаз, так и с кристаллической структурой поверхности. Одна из рассматриваемых в данном разделе упорядоченных систем адсорбатов на кремнии – это субмонослойная система Au/Si(100), в которой при различных покрытиях золота существуют поверхностные фазы Si(100)c(8×2)-Au, Si(100)5×1-Au, Si(100)√26×3-Au [7], формирующиеся после прогрева при температуре 850°C образцов Si(100) с предварительно осаждёнными на них при комнатной температуре плёнками золота субмонослойных покрытий. Если рассматривать поверхностные фазы на кремнии в качестве дополнительных каналов проводимости, то смену поверхностных фаз при увеличении покрытия адсорбата можно представить как смену каналов проводимости на подложке. Так, согласно результатам измерений, поверхностная проводимость реконструированной подложки Au/Si(100) оказалась выше, чем проводимость чистой подложки с поверхностной фазой Si(100)2×1 (подложка *n*-типа, удельное сопротивление 45 Ом·см) (Рисунок 1а). При этом вклад в проводимость подложки  $\Delta\sigma$  для поверхностной фазы Si(100)√26×3-Au оценивается выше, чем для Si(100)c(8×2)-Au примерно в два раза:  $(11,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$  и  $(6,0 \pm 1,9) \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$ , соответственно. Вместе с тем показано, что формирование поверхностных фаз может не только увеличивать поверхностную проводимость подложки, но и уменьшать её. Изменение поверхностной проводимости подложки  $\Delta\sigma$  для поверхностной фазы Si(100)2×3-Na является отрицательным и

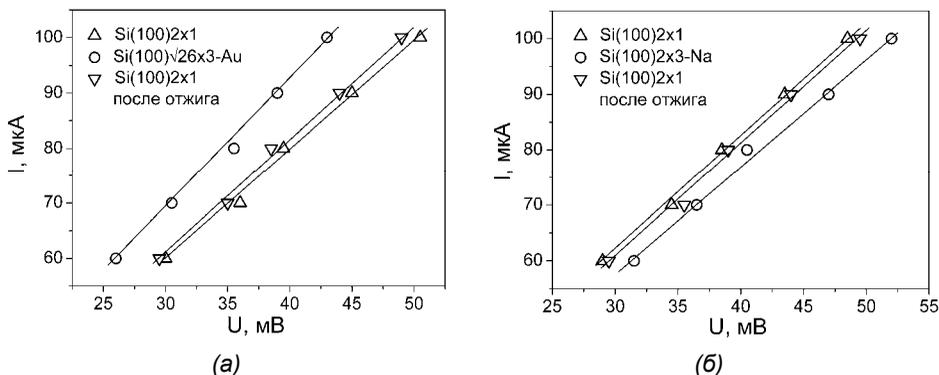


Рисунок 1 – Вольт-амперные характеристики подложки Si(100) до и после формирования поверхностных фаз (а) Si(100)26×3-Au и (б) Si(100)2×3-Na, измеренные четырёхзондовым методом *in situ* при комнатной температуре.

составляет  $-(1,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$  (Рисунок 16). Уменьшение поверхностной проводимости кремния с поверхностной фазой Si(100)2×3-Na по сравнению с подложкой Si(100)2×1 может быть обусловлено несколькими причинами. С одной стороны, согласно данным работы [15], данная система является полупроводниковой, следовательно, а её проводимость слабо различимой по сравнению с атомарно-чистой подложкой. С другой стороны, согласно исследованиям с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) образование данной сверхструктуры сопровождается сильным массопереносом кремния из участков поверхности с поверхностной фазой Si(100)2×1 к поверхностной фазе Si(100)2×3-Na, что приводит к формированию шероховатой поверхности, снижая проводимость системы из-за рассеяния носителей заряда на границах доменов поверхности.

Кроме того, были проведены измерения поверхностной проводимости и для подложек с поверхностными фазами Si(100)2×2-Al и Si(100)c(4×12)-Al, которые формируются на поверхности Si(100) при одинаковом покрытии алюминия (0,5 МС), однако, формирование фазы Si(100)2×2-Al происходит при комнатной температуре, а для Si(100)c(4×12)-Al требуется прогрев подложки при температуре около 600°C [7]. При этом было установлено, что электрическая проводимость подложки с поверхностной фазой Si(100)c(4×12)-Al оказалась выше, чем поверхностная проводимость подложки с поверхностной фазой Si(100)2×2-Al. Вклад поверхностной фазы Si(100)c(4×12)-Al в проводимость подложки оценивается как  $(6 \pm 1) \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$ , в то время как вклад поверхностной фазы Si(100)2×2-Al является близким к проводимости атомарно-чистой подложки с поверхностной фазой Si(100)2×1 и составил  $(0,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$ . Результаты проведённых экспериментов показали

возможность формирования реконструированной поверхности подложки с различным значением поверхностной проводимости в зависимости от концентрации атомов адсорбата в поверхностной фазе и её кристаллической структуры.

В конце раздела приводится обобщение результатов исследований электрической проводимости поверхностных фаз на кремнии (100).

Во втором разделе второй главы рассматривается электрическая проводимость поверхностных фаз различных адсорбатов на поверхности кремния Si(111). Представлены результаты измерений проводимости поверхностных фаз в системах Cu/Si(111), Au/Si(111), Ag/Si(111), In/Si(111) и других. Показано, что, как и в предыдущем разделе, поверхностные фазы на Si(111) также оказывают влияние на поверхностную проводимость подложки. Так, например, было обнаружено, что формирование поверхностной фазы Si(111)<sub>5,55</sub>×<sub>5,55</sub>-Cu приводит к повышению проводимости подложки на  $(8,4 \pm 0,2) \times 10^{-4}$  Ом<sup>-1</sup>/□, что является наиболее высоким показателем для упорядоченных поверхностных фаз при комнатной температуре.

Установлено, что вклад в проводимость подложки (*n*-типа, удельное сопротивление 10-25 Ом·см) для поверхностной фазы Si(111)<sub>5</sub>×<sub>2</sub>-Au оценивается как  $(5,6 \pm 2,1) \cdot 10^{-5}$  Ом<sup>-1</sup>/□, поверхностная фаза Si(111)<sub>α</sub>-√3×√3-Au повышает проводимость подложки на  $(9,8 \pm 2,8) \cdot 10^{-5}$  Ом<sup>-1</sup>/□, поверхностная фаза Si(111)<sub>β</sub>-√3×√3-Au повышает проводимость подложки на  $(11,2 \pm 2,5) \cdot 10^{-5}$  Ом<sup>-1</sup>/□, а поверхностная фаза Si(111)<sub>6</sub>×<sub>6</sub>-Au - на  $(14,7 \pm 3,0) \cdot 10^{-5}$  Ом<sup>-1</sup>/□ (Рисунок 2а). Проведён анализ проводимости подложек с поверхностной фазой Si(111)<sub>√3</sub>×<sub>√3</sub>-Ag при понижении температуры подложки от комнатной до 160 К. Так, вклад поверхностной фазы Si(111)<sub>√3</sub>×<sub>√3</sub>-Ag при комнатной температуре оценивался как  $(3,0 \pm 0,8) \times 10^{-4}$  Ом<sup>-1</sup>/□, а при понижении температуры подложки этот вклад значительно увеличился и при температуре около 160 К составил  $(4,8 \pm 0,6) \times 10^{-4}$  Ом<sup>-1</sup>/□.

Измерены значения поверхностной проводимости подложки для поверхностных фаз в субмонослойной системе In/Si(111) (Рисунок 2б). Кроме того, исследована зависимость проводимости поверхностных фаз Si(111)<sub>√3</sub>×<sub>√3</sub>-In и Si(111)<sub>4</sub>×<sub>1</sub>-In при температуре 150 К от кристаллографического направления поверхности подложки, вдоль которого пропускается электрический ток. Показано, что изменение поверхностной проводимости подложек с поверхностными фазами Si(111)<sub>√3</sub>×<sub>√3</sub>-In и Si(111)<sub>4</sub>×<sub>1</sub>-In зависит от угла поворота зондовой головки. Установлено, что максимумы и минимумы проводимости повторяются через 60°. Сопоставление кристаллических моделей данных поверхностных фаз с кристаллографическими направлениями поверхности подложки, вдоль которых осуществлялось измерение поверхностной проводимости, показывает, что максимумы проводимости совпадают с направлением рядов цепочек индия для фазы Si(111)<sub>4</sub>×<sub>1</sub>-In и также соответствуют направлению с максимальной атомной плотностью для поверхности Si(111)<sub>√3</sub>×<sub>√3</sub>-In.

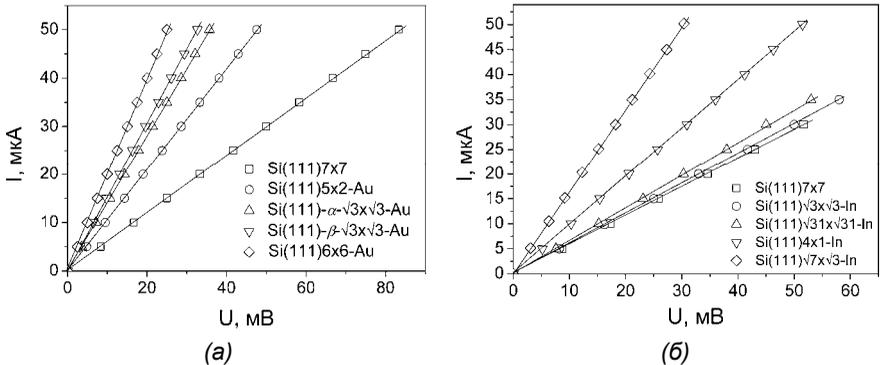


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики подложки Si(111) до и после формирования поверхностных фаз в субмонослойных системах (а) Au/Si(111) и (б) In/Si(111).

В конце раздела приводится обобщение результатов исследований электрической проводимости поверхностных фаз на кремнии (111).

**Третья глава** посвящена изучению влияния качества поверхности на электропроводность упорядоченных структур, представлены результаты изучения проводимости поверхностных фаз при наличии различных дефектов на поверхности, которые формировались адсорбцией чужеродных атомов, изменением кристаллической структуры, а также при формировании островков и изменении морфологии поверхности.

В первом разделе представлены результаты изучения влияния адсорбированных атомов на проводимость подложки. Показано, что разрушение упорядоченной кристаллической структуры поверхностных фаз уменьшает электропроводность подложки. Такой характер поведения поверхностной проводимости был обнаружен, например, при экспозиции поверхностных структур в атмосфере атомарного водорода, молекулярного кислорода, а также при выносе исследуемых образцов на воздух. Так, было установлено, что поверхностная проводимость подложки с увеличением времени экспозиции реконструированной поверхности кремния в атмосфере кислорода уменьшается, если кислород взаимодействует с атомами в приповерхностном (реконструированном) слое, разрушая упорядоченную структуру поверхности. Это наблюдалось, например, в случае с поверхностью Si(100)2×1, Si(111)7×7 и Si(111)5,55×5,55-Cu. Однако, если взаимодействие поверхности с кислородом слабое, то, соответственно, изменения проводимости при экспозиции в атмосфере кислорода являются незначительными, как, например, в случае с

поверхностью  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$ , у которой поверхностная проводимость уменьшилась примерно на 15% при экспозиции в атмосфере кислорода 15000 Ленгмюр, в то время как для поверхностной фазы  $\text{Si}(111)5,55\times 5,55\text{-Cu}$  проводимость уменьшилась на 80% при той же экспозиции (Рисунок 3а).

Была исследована корреляция кристаллической структуры и поверхностной проводимости подложки при взаимодействии атомарного водорода с поверхностными фазами  $\text{Si}(100)2\times 1$  и  $\text{Si}(100)2\times 3\text{-Na}$  (Рисунок 3б). Показано, что так же, как и в случае с кислородом, экспозиция в атмосфере атомарного водорода приводит к уменьшению поверхностной проводимости исследуемых подложек. Данное уменьшение также можно связать с разрушением упорядоченной структуры поверхностных фаз. При этом необходимо отметить следующее. Уменьшение проводимости при экспозиции поверхности в атомарном водороде как в случае с фазой  $\text{Si}(100)2\times 1$ , так и в случае с фазой  $\text{Si}(100)2\times 3\text{-Na}$ , происходит гораздо сильнее, чем в случае, например, адсорбции кислорода. Так, уменьшение проводимости при экспозиции поверхности  $\text{Si}(100)2\times 1$  на воздухе составляло  $\sim 3\times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$ , в то время как изменение проводимости после экспозиции 5000 Л поверхности  $\text{Si}(100)2\times 1$  в атомарном водороде составило  $-(7,2\pm 0,7)\cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$ , то есть более чем в два раза. Последнее связано с тем, что взаимодействие атомарного водорода с поверхностью кремния при больших экспозициях приводит к формированию шероховатой поверхности из-за процесса травления [17].

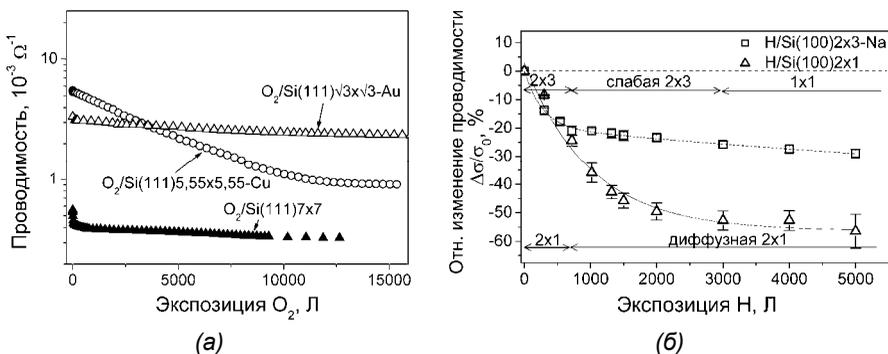


Рисунок 3 - (а) Результаты измерения проводимости для поверхностей кремния:  $\text{Si}(111)7\times 7$ ,  $\text{Si}(111)5,55\times 5,55\text{-Cu}$  и  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$  при их экспозиции в атмосфере кислорода. (б) Изменения поверхностной проводимости и картин ДМЭ поверхности  $\text{Si}(100)2\times 1$  и  $\text{Si}(100)2\times 3\text{-Na}$  при экспозиции в атомарном водороде.

Исследована поверхностная проводимость подложки Si(111) при осаждении кремния на реконструированные поверхности. Показано, что поверхностная проводимость уменьшается, когда кристаллическая структура поверхностной фазы, согласно результатам наблюдений методом ДМЭ, разрушается. И наоборот, когда кристаллическая структура поверхности сохраняется (сохраняется упорядоченная структура захороненной кремнием границы раздела), тогда проводимость такой поверхностной фазы должна остаться такой же, как и до осаждения кремния. Измерения поверхностной проводимости показали, что при осаждении до 3 МС кремния при комнатной температуре на поверхностные фазы Si(100)4×3-In и Si(100)2×3-Na проводимость остаётся постоянной (Рисунок 4а). Известно, что в состав этих поверхностных фаз входит, кроме атомов адсорбата, и кремний (7/12 МС индия и 1/3 МС кремния в поверхностной фазе Si(100)4×3-In и 1/3 МС натрия и 1/3 МС кремния в поверхностной фазе Si(100)2×3-Na). С помощью ДМЭ было продемонстрировано, что кристаллическая структура таких поверхностных фаз, состоящих из атомов адсорбата и атомов подложки, более стабильная при адсорбции атомов кремния, в отличие от поверхностных фаз, в состав которых входят только атомы адсорбата. В последнем случае электрические измерения показывают, что проводимость подложки с поверхностной фазой Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -In уменьшается при напылении до 3 МС кремния примерно на 15%, что говорит о том, что данная поверхностная фаза разрушается, а образованный ею канал проводимости исчезает, приводя к падению проводимости подложки.

Второй раздел третьей главы посвящён исследованию влияния доменных границ на поверхностную проводимость. Проведено сравнение поверхностной проводимости однодоменной поверхностной фазы Si(111)5×2-Au, сформированной методом поверхностной диффузионной разгонки из предварительно осаждённой полоски золота с покрытием около 10 МС золота, с такой же поверхностной фазой, только трёхдоменной, полученной обычным способом молекулярно-лучевой эпитаксии. Измеренный профиль поверхностной проводимости демонстрирует прямую корреляцию результатов измерений с наблюдениями дифракции от различных областей подложки (Рисунок 4б). Измерение проводимости вне границ полоски показало увеличение проводимости по сравнению с первоначальной подложкой. Это увеличение проводимости связано с формированием однодоменной поверхностной фазы Si(111)5×2-Au, которая сформировалась в результате диффузии атомов золота по поверхности подложки. Оценка электропроводности данной поверхностной фазы показала значение вклада поверхностной проводимости как  $(17,7\pm 0,2)\times 10^{-5}$  Ом<sup>-1</sup>/□ по

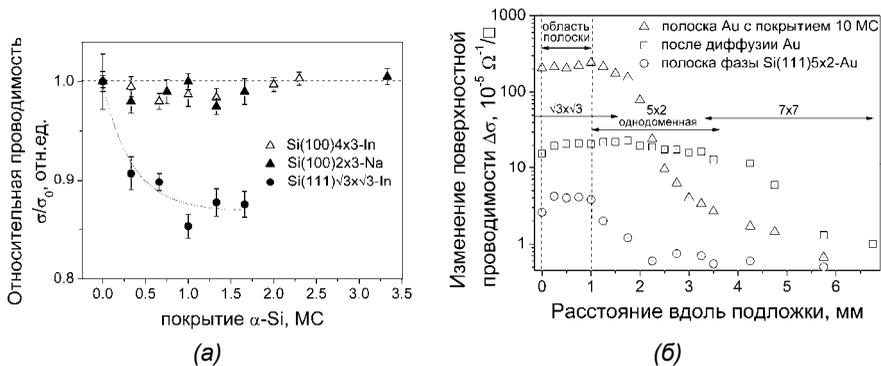


Рисунок 4 – (а) Относительное изменение проводимости после осаждения кремния на реконструированные подложки при комнатной температуре. (б) Изменение поверхностной проводимости Si(111) до разгонки полоски золота толщиной около 10 нм (треугольники), после разгонки полоски золота при температуре 900°C (указаны картины ДМЭ) с помощью поверхностной диффузии (квадраты), после формирования трёхдоменной поверхностной фазы Si(100)5×2-Au (кружки).

сравнению с поверхностной проводимостью чистой подложки. Поверхностная проводимость трёхдоменной поверхностной фазы Si(111)5×2-Au (при напылении 0,4 нм золота и отжиге подложки при 900°C) составила  $(4,0 \pm 0,2) \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}/\square$ , что существенно меньше, чем для однодоменной поверхностной фазы Si(111)5×2-Au.

Другой пример, демонстрирующий влияние доменных границ на проводящие свойства поверхности, представлен для реконструкции Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au (Рисунок 5а), которая обладает большим количеством доменных стенок [18], появление которых вызвано напряжением решетки поверхности. Однако при напылении на неё порядка 0,15 нм индия и кратковременном отжиге при 600°C напряжение снимается, и доменные стенки исчезают, формируя «гомогенную» поверхность Si(111)- $h$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Au,In) [19]. Установлено, что данная поверхность демонстрирует более высокую проводимость по сравнению с проводимостью поверхности Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au, что хорошо коррелирует с исчезновением доменных стенок. Увеличение проводимости при этом связано с двумя факторами: уменьшением рассеяния носителей заряда на доменных стенках и формированием двумерного электронного газа на поверхности [20]. Кроме того, было установлено, что восстановление поверхности Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au с доменными стенками путём десорбции индия приводит опять к уменьшению проводимости.

Третий раздел третьей главы посвящён изучению влияния шероховатости поверхности подложки на результаты измерений проводимости.

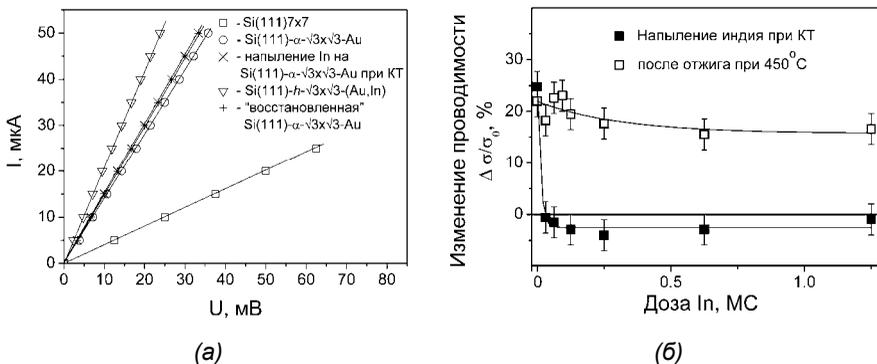


Рисунок 5 - (а) Изменение электрической проводимости подложки при изменении структуры поверхности: исходная Si(111)7×7, Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au, Si(111)- $h$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Au,In), “восстановленная” Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au. (б) Поведение поверхностной проводимости образца при осаждении индия на реконструкцию Si(100)c(4×12)-Al.

Для изучения корреляции изменений проводимости и морфологии поверхности была выбрана поверхностная фаза Si(100)c(4×12)-Al. На рисунке 5б показано изменение проводимости поверхностной фазы Si(100)c(4×12)-Al в зависимости от количества индия, осаждённого как при комнатной температуре, так и на подложку при температуре около  $450^\circ\text{C}$ . Исследование поверхности In/Si(100)c(4×12)-Al при помощи СТМ показало высокую концентрацию трёхмерных островков индия при его напылении при комнатной температуре – около  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . После отжига количество островков уменьшается, и их концентрация составляет около  $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . На рисунке 5б видно, что проводимость системы In/Si(100)c(4×12)-Al с более высокой концентрацией островков ниже, чем в случае с меньшей концентрацией островков. Из результатов эксперимента следует, что образование островков индия на поверхности Si(100)c(4×12)-Al приводит к резкому уменьшению проводимости поверхностного слоя за счёт увеличения рассеяния носителей заряда на образовавшихся островках адсорбата. После отжига такого образца число островков индия резко уменьшается, и рассеяние на них носителей заряда перестаёт оказывать существенное влияние на проводимость.

Как было показано в главе 2, формирование поверхностной фазы Si(100)2×3-Na сопровождается существенным перераспределением атомов кремния верхнего слоя подложки, что приводит к возникновению шероховатой поверхности и, соответственно, уменьшению поверхностной проводимости такой подложки. Морфологией данной поверхности можно управлять, например, добавляя небольшое количество кремния на поверхность предварительно перед формированием

поверхностной фазы. Была измерена поверхностная проводимость подложки с поверхностной фазой  $\text{Si}(100)2 \times 3\text{-Na}$  при температуре около 180 К с различным количеством предварительно осаждённого аморфного кремния. Установлено, что подложка с поверхностной фазой  $\text{Si}(100)2 \times 3\text{-Na}$  демонстрирует проводимость ниже, чем у подложки  $\text{Si}(100)2 \times 1$  на  $12 \pm 2$  %. Было обнаружено, что после предварительного напыления кремния электрическое сопротивление подложки с поверхностной фазой  $\text{Si}(100)2 \times 3\text{-Na}$  меняется периодически в зависимости от количества кремния. Так, поверхностная фаза  $\text{Si}(100)2 \times 3\text{-Na}$  с предварительно осаждённым кремнием в количестве  $1/3$  МС демонстрирует сопротивление ниже, чем фаза  $\text{Si}(100)2 \times 3\text{-Na}$  без осаждения кремния, и даже ниже, чем сопротивление первоначальной подложки  $\text{Si}(100)2 \times 1$ . С увеличением покрытия кремния сопротивление подложки с фазой  $\text{Si}(100)2 \times 3\text{-Na}$  начинает расти и достигает максимума при  $\theta_{\text{Si}} \sim 0,9$  МС, а затем снова уменьшается, принимая второе минимальное значение сопротивления уже при  $\theta_{\text{Si}} \sim 1,3$  МС.

**Четвёртая глава** посвящена способам модификации электрической проводимости поверхностных структур. Модификация проводимости является важным шагом к практическому использованию поверхностных фаз, так как, изменяя их свойства целенаправленным способом, можно получать желаемые характеристики наноструктур.

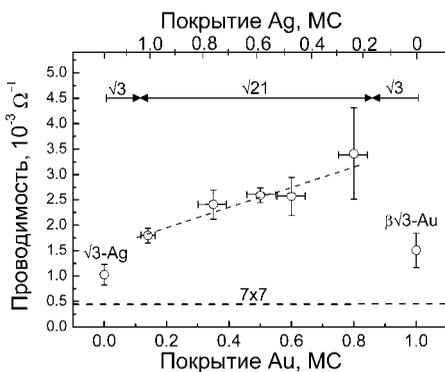
Первый раздел четвёртой главы посвящён изучению электрической проводимости трехкомпонентных поверхностных фаз, в состав которых входят, кроме атомов кремния, ещё и атомы двух различных адсорбатов, например, золота и серебра, золота и индия, золота и натрия. Показано, что адсорбция более 0,15 МС индия на поверхность  $\text{Si}(111)\text{-}h\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-(Au,In)}$  приводит к росту поверхностной проводимости почти в 3 раза до тех пор, пока покрытие In не достигает около 0,7-0,8 МС, а затем наблюдается уменьшение проводимости. Наблюдения такой поверхности при помощи СТМ показали формирование на поверхности островков, а кристаллическая структура поверхности при этом осталась неизменной. Следовательно, рост проводимости связан с продолжением процесса легирования поверхности электронами при поступлении новых атомов In (увеличением плотности двумерного электронного газа), а уменьшение - с рассеянием носителей на островках. Кроме того, в системе  $(\text{Au,In})/\text{Si}(111)$  обнаружено формирование новых поверхностных реконструкций:  $\text{Si}(111)2\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-(Au,In)}$ , вклад которой в поверхностную проводимость подложки оценивался как  $(1,5 \pm 0,2) \times 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}/\square$ , и  $\text{Si}(111)\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-(Au,In)}$ , с проводимостью  $(3,2 \pm 0,4) \times 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}/\square$ .

Одним из способов управления свойствами упорядоченных реконструкций адсорбатов на кремнии является изменение их стехиометрического состава. Примером такой системы является реконструкция  $\text{Si}(111)\sqrt{21} \times \sqrt{21}\text{-(Au,Ag)}$ . Данная

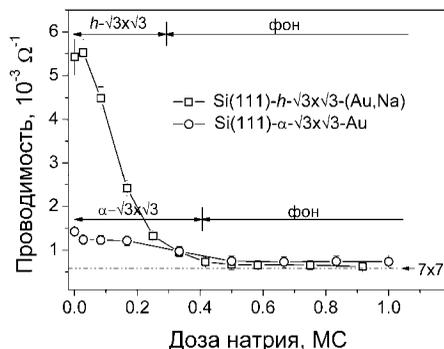
поверхностная фаза является уникальным случаем двумерного электронного сплава Юм-Розери [21], и в ней наблюдается корреляция между соотношением числа электронов проводимости к числу атомов и её кристаллической структурой. На рисунке 6а показана зависимость проводимости подложки  $\text{Si}(111)\sqrt{21}\times\sqrt{21}\text{-(Au,Ag)}$  от соотношения количества атомов адсорбата (золота и серебра). Установлено, что при увеличении покрытия золота в фазе  $\text{Si}(111)\sqrt{21}\times\sqrt{21}\text{-(Au,Ag)}$  и, соответственно, уменьшении покрытия серебра таким образом, чтобы их суммарное покрытие оставалось в пределах 1,1-1,2 МС, поверхностная проводимость такой подложки возрастает. Электрическая проводимость поверхностных фаз определяется суммой  $\sigma_{SS} + \sigma_{SCL}$ , где  $\sigma_{SS}$  проводимость поверхностных состояний, а  $\sigma_{SCL}$  - проводимость приповерхностного слоя объёмного заряда. Так как поверхностная фаза  $\text{Si}(111)\sqrt{21}\times\sqrt{21}\text{-(Au,Ag)}$  характеризуется наличием поверхностных состояний, которые имеют металлический характер [13], то можно считать, что вклад поверхностных состояний в проводимость ( $\sigma_{SS}$ ) будет одинаковым при любом соотношении адсорбатов. Показано, что увеличение проводимости фазы  $\text{Si}(111)\sqrt{21}\times\sqrt{21}\text{-(Au,Ag)}$  связано с ростом проводимости приповерхностной области подложки ( $\sigma_{SCL}$ ).

Проведено исследование влияния адсорбции натрия на структурные и электрические свойства поверхности  $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$ . Установлено, что, как и в случае с адсорбцией индия, осаждение около 0,1 МС натрия на поверхность  $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$  при температуре около 300°C приводит к формированию гомогенной поверхности  $\text{Si}(111)\text{-}h\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Au,Na)}$  без доменных стенок. Показано, что проводимость такой подложки увеличивается, причём наблюдаемый рост проводимости в этом случае значительно выше, чем при осаждении индия. Измерения методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР) показали, что адсорбция натрия приводит к изменениям электронной структуры поверхности, которые состоят в пересечении уровня Ферми поверхностной зоной  $S_1$ . В отличие от поверхности  $\text{Si}(111)\text{-}h\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Au,In)}$ , для фазы  $\text{Si}(111)\text{-}h\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Au,Na)}$  заполнение зоны  $S_1$  составляет 1 электрон от каждого атома натрия на ячейку. Таким образом, высокую электропроводность поверхности  $\text{Si}(111)\text{-}h\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Au,Na)}$  можно объяснить высокой концентрацией носителей заряда в поверхностных состояниях. Если на данную поверхность адсорбировать натрий при комнатной температуре, проводимость опять уменьшается до значения, соответствующего проводимости атомарно-чистой подложки (Рисунок 6б). Данные ФЭСУР при этом демонстрируют размытие зоны  $S_1$  вплоть до полного её исчезновения при увеличении концентрации атомов натрия на поверхности.

В третьем разделе четвёртой главы представлено влияние фазовых переходов на поверхностную проводимость подложки. Одним из таких переходов является переход



(a)



(б)

Рисунок 6 – (а) Проводимость подложки кремния с реконструкцией  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  при различных покрытиях золота и серебра. (б) Проводимость подложки с поверхностными фазами  $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$ ,  $\text{Si}(111)\text{-}h\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-(Au,Na)}$  после адсорбции натрия при комнатной температуре.

металл-изолятор в системе  $\text{In/Si}(111)$ , когда адсорбция менее 0,1 МС натрия при комнатной температуре на поверхность  $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-In}$  приводит к формированию поверхностной фазы  $\text{Si}(111)4 \times 2\text{-(In,Na)}$ . Измерения проводимости показали, что данный переход приводит к уменьшению проводимости, то есть демонстрирует переход металл-изолятор уже при комнатной температуре. Таким образом, фазовые переходы являются хорошим стимулом для изучения транспорта носителей заряда в таких системах вследствие возможности контроля и управления электрическими свойствами сверхтонких слоёв. Небольшое количество адсорбата (порядка 0,01-0,1 МС) является достаточным для того, чтобы существенно изменить природу таких слоёв, например, из полупроводниковой в металлическую, как в случае с переходом от полупроводниковой поверхности  $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Ag}$  к поверхности  $\text{Si}(111)\sqrt{21} \times \sqrt{21}\text{-(Au,Ag)}$  с металлической зоной поверхностных состояний [13].

Другой системой, демонстрирующей корреляцию поверхностной проводимости с структурой поверхности при адсорбции атомов адсорбата на поверхностную фазу, является субмонослойная система  $(\text{Au,Ag})/\text{Si}(111)$ . Нанесение серебра на поверхность  $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$  при температуре  $350^\circ\text{C}$  приводит, как показали наблюдения ДМЭ, к последовательному формированию различных сверхструктур. Так, после нанесения  $\sim 0,1$  МС серебра формируется сверхструктура с периодичностью  $\sqrt{93} \times \sqrt{93}\text{-R} \pm 21^\circ$ . При увеличении дозы адсорбируемого серебра поверхность подложки перестраивается из  $\sqrt{93} \times \sqrt{93}$  в  $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ , и далее – в  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ . Показано, что данные изменения структуры поверхности приводят к изменениям поверхностной проводимости подложки:

поверхностная фаза  $\text{Si}(111)\sqrt{93}\times\sqrt{93}\text{-(Au,Ag)}$  увеличивает проводимость,  $\text{Si}(111)2\sqrt{3}\times 2\sqrt{3}\text{-(Au,Ag)}$  уменьшает проводимость, а  $\text{Si}(111)\sqrt{21}\times\sqrt{21}\text{-(Au,Ag)}$  опять увеличивает проводимость подложки. Установлены основные механизмы транспорта носителей заряда в данных поверхностных фазах.

Исследован переход от поверхностной фазы  $\text{Si}(111)\text{-}\beta\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$  к поверхностной фазе  $\text{Si}(111)6\times 6\text{-Au}$  (переход типа стекло-кристалл), который осуществляется при прогреве поверхности  $\text{Si}(111)\text{-}\beta\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$  при  $650^\circ\text{C}$ , а затем медленном остывании примерно в течение 10 минут [18]. При этом проводимость фазы  $6\times 6$  оказалась выше, чем для  $\beta\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ , из-за того, что фаза  $6\times 6$  имеет хорошо упорядоченную кристаллическую структуру в отличие от  $\beta\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ , которая имеет высокую плотность неупорядоченных доменных границ. Установлено, что данный переход может быть осуществлён адсорбцией 0,3 МС серебра на поверхность  $\text{Si}(111)\text{-}\beta\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$  при температуре  $350^\circ\text{C}$ . Электрические измерения показали, что проводимость поверхности  $\text{Si}(111)6\times 6\text{-(Au,Ag)}$  выше, чем для  $\text{Si}(111)\text{-}\beta\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$ , но ниже, чем для поверхностной фазы  $\text{Si}(111)6\times 6\text{-Au}$ , что связано с тем, что дополнительное количество атомов серебра изменяет свойства пространственного заряда приповерхностной области подложки.

**Пятая глава** посвящена измерениям электрической проводимости наноструктур на поверхности кремния – сверхтонких плёнок и нанопроволок. Разработка методов создания наноструктур с использованием полупроводниковых, металлических и других материалов является одной из основных задач нанoeлектроники. Не менее важно знать закономерности электрического транспорта таких структур.

Первый раздел пятой главы посвящён исследованию электрической проводимости сверхтонких плёнок адсорбата, осаждённых при комнатной температуре на реконструированную поверхность кремния  $\text{Si}(100)$ .

Измерения электрической проводимости сверхтонких плёнок золота на поверхности  $\text{Si}(100)2\times 1$  показали, что при покрытии адсорбированного материала около 1 МС наблюдается перколяционный характер проводимости. При таком покрытии удельная электропроводность золотой плёнки составляет оценочно  $(5,1\pm 1,7)\cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ , что на два порядка меньше, чем для объёмного золота –  $4,55\cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ , что связано с наличием большого количества дефектов, а также влиянием размерного эффекта. При этом, если плёнка адсорбата не обладает хорошей электропроводностью и растёт в виде островков, как, например, плёнка сурьмы на  $\text{Si}(100)2\times 1$ , то на начальной стадии адсорбции проводимость подложки уменьшается, а при дальнейшем осаждении сурьмы возрастания проводимости не наблюдается.

Очевидно, что для улучшения электрических характеристик сверхтонких плёнок необходимо совершенствовать их структурные свойства, уменьшая количество дефектов, а также формируя плёнки с улучшенной морфологией поверхности. Одним

из способов повышения качества плёнок является их формирование на предварительно реконструированной поверхности. Во втором разделе пятой главы было установлено, что поверхностные реконструкции могут по-разному влиять на механизмы роста плёнок, а, следовательно, и определять электрические свойства таких плёнок. В качестве примера были исследованы морфология и проводимость 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. На рисунке 7а представлены результаты измерения электрической проводимости плёнок золота на реконструкциях индия: Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -In и Si(111) $\sqrt{31}\times\sqrt{31}$ -In, а также на чистой поверхности Si(111)7 $\times$ 7. Видно, что с увеличением покрытия проводимость пленки золота на поверхности Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -In растёт гораздо быстрее, чем на поверхности Si(111) $\sqrt{31}\times\sqrt{31}$ -In. Это связано с различиями в механизме роста пленок. Как показали СТМ изображения поверхности, золото на Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -In растёт послойно уже при покрытиях порядка 1-2 МС, создавая сверхтонкий проводящий слой. На Si(111) $\sqrt{31}\times\sqrt{31}$ -In при тех же покрытиях золото растёт в основном островками, не формируя сплошного и однородного слоя, что приводит к тому, что проводимость такой системы меньше чем у пленок золота, которые растут послойно. Аналогично ведёт себя проводимость для плёнок золота на реконструкциях Si(111)4 $\times$ 1-In и Si(111) $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In: проводимость плёнки золота на Si(111) $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In всегда выше, чем для золота на реконструкции Si(111)4 $\times$ 1-In, из-за отличий в морфологии поверхности этих плёнок, что подтверждается наблюдениями СТМ. Таким образом, было показано, что реконструкция поверхности оказывает влияние на механизмы роста металлических плёнок, что отражается на их электрической проводимости

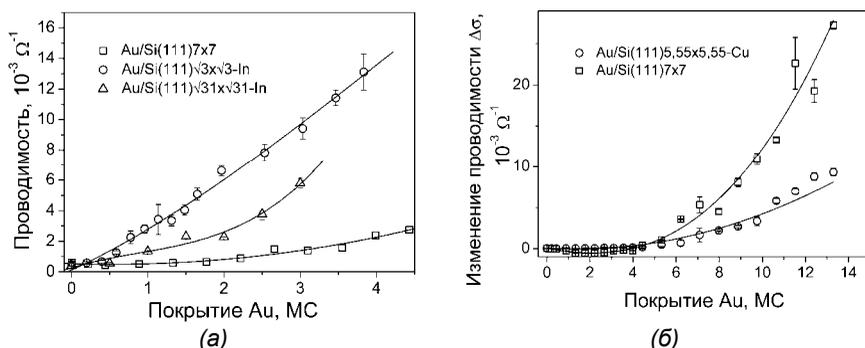


Рисунок 7 – (а) Зависимость проводимости плёнок золота от их покрытия на реконструкциях Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -In,  $\sqrt{31}\times\sqrt{31}$ -In и Si(111)7 $\times$ 7. (б) Изменения поверхностной проводимости подложки Si(111) после напыления золота на поверхности Si(111)7 $\times$ 7 и Si(111)5,55 $\times$ 5,55-Cu при комнатной температуре.

Одной из причин формирования дефектной плёнки адсорбата является образование его силицида, а именно участие атомов кремния в формировании плёнки, в результате чего поверхность, как подложки, так и формирующейся на ней плёнки силицида, становится шероховатой. В случае с плёнками золота на реконструированной поверхности In/Si(111) островковый рост наблюдается, когда реконструкция содержит атомы кремния, которые взаимодействуют с прибывающими атомами золота. Морфология поверхности такой плёнки, согласно данным СТМ, является шероховатой, что значительно ухудшает её электрические характеристики. Для достижения более высокой степени структурного совершенства такой металлической плёнки в качестве модификатора поверхности предложено использовать поверхностную фазу Si(111)5,55×5,55-Cu, которая блокирует процесс силицидообразования, в результате чего выращенная на такой поверхности плёнка выглядит более гладкой. Очевидно, что улучшение морфологии поверхности плёнок должно повлиять на их электрические свойства. На рисунке 7б показаны результаты измерений поверхностной проводимости плёнки золота, осаждённой на поверхностной фазе Si(111)5,55×5,55-Cu, в сравнении с плёнкой золота, осаждённой на фазе Si(111)7×7 в зависимости от покрытия золота. Видно, что проводимость плёнки золота на фазе Si(111)5,55×5,55-Cu при увеличении покрытия золота выше, чем для плёнки золота на Si(111)7×7, что хорошо коррелирует с морфологией выращенных плёнок. Принимая во внимание, что толщина плёнки золота, выращенной на реконструкции Si(111)5,55×5,55-Cu, составляет около 4 нм при покрытии золота 13 МС, её удельное сопротивление можно оценить как  $(1,4 \pm 0,4) \times 10^{-5}$  Ом-см, что примерно в шесть раз выше удельного сопротивления объёмного золота  $2,4 \times 10^{-6}$  Ом-см.

Недостатком поверхностных фаз, затрудняющим их использование для решения реальных задач электроники, является то, что они могут существовать только в условиях сверхвысокого вакуума и разрушаются при взаимодействии с химически активными газами, например, кислородом. Поэтому, важной задачей является поиск таких наноструктур на основе поверхностных фаз, которые обладали бы повышенной стабильностью, а их электрические свойства не менялись бы при внешних воздействиях, допуская в пределе возможность их извлечения из сверхвысокого вакуума в окружающую атмосферу. В настоящей работе исследована стабильность по отношению к экспозиции в кислороде электрических свойств (проводимости) системы Au/Si(111)5,55×5,55-Cu, сформированной путем осаждения золота при комнатной температуре на предварительно подготовленную поверхность Si(111)5,55×5,55-Cu. Изучена зависимость поверхностной проводимости системы Au/Si(111)5,55×5,55-Cu при различных покрытиях золота от величины экспозиции образцов в кислороде. Установлено, что экспозиция поверхности Si(111)5,55×5,55-Cu

в кислороде при комнатной температуре приводит к значительному падению проводимости образца, а проводимость слоистой структуры Au/Si(111)5,55×5,55-Cu при экспозиции в кислороде зависит от количества осажденного золота, причем при покрытии выше золота выше 3 МС проводимость такой плёнки не зависит от величины экспозиции.

Ступени на поверхности кристаллов часто играют ключевую роль в физических процессах, таких как диффузия, эпитаксиальный рост и др., а также ступени используются как шаблоны для формирования одномерных систем, например, массивов нанопроволок в системах Si(557)-Au [22]. Нанопроволоки меди (ширина от 20 до 80 нм, высота - 1-3 нм), ориентированные вдоль ступеней, формировались путём адсорбции до 15 МС меди при комнатной температуре на поверхность Si(111)5,55×5,55-Cu. Электрические измерения показали, что такая система проявляет свойства анизотропии электрической проводимости. Исходя из анализа картин ДМЭ и пространственной конфигурации образца относительно измерительных зондов (направления пропускаемого тока), установлено, что максимум проводимости наблюдался в направлении  $[1\bar{1}0]$ , то есть в том направлении, вдоль которого ориентированы ступени и, соответственно, нанопроволоки. В то же время в направлении  $[\bar{1}12]$  (поперёк ступеней) проводимость была минимальной. Установлено, что электрическая проводимость вдоль ступеней с нанопроволоками примерно в три раза выше, чем в перпендикулярном направлении. Удельное сопротивление такой нанопроволоки было оценено как 8 мкОм·см. Температурные исследования проводимости в области температур 200 - 300 К показали, что проводимость имеет металлический характер. При покрытии меди около 25 МС на картине СТМ наблюдалось срастание нанопроволок между собой, что, в свою очередь, приводит к формированию на поверхности сплошной плёнки, и, соответственно, исчезновению анизотропии проводимости.

В третьем разделе пятой главы показано влияние молекул фуллеренов  $C_{60}$  на проводимость реконструированной поверхности Si(111). Установлено, что фуллерены, действуя в качестве акцептора электрического заряда, изменяют поверхностную проводимость подложки. Так, было обнаружено, что после осаждения фуллеренов на поверхность Si(111)7×7 поверхностная проводимость возрастает (Рисунок 8а), что объясняется возрастанием электропроводности фуллереновой плёнки из-за переноса электрического заряда на слой фуллеренов. Похожие изменения проводимости наблюдаются и для поверхности Si(111)3×1-Na, которая, как и Si(111)7×7, характеризуется низкой проводимостью. При этом осаждение фуллеренов на металлическую поверхностную фазу, например, Si(111)5×2-Au, приводит, наоборот, к уменьшению проводимости. В случае с поверхностью Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au, где взаимодействие фуллеренов с реконструированным слоем очень слабое [23],

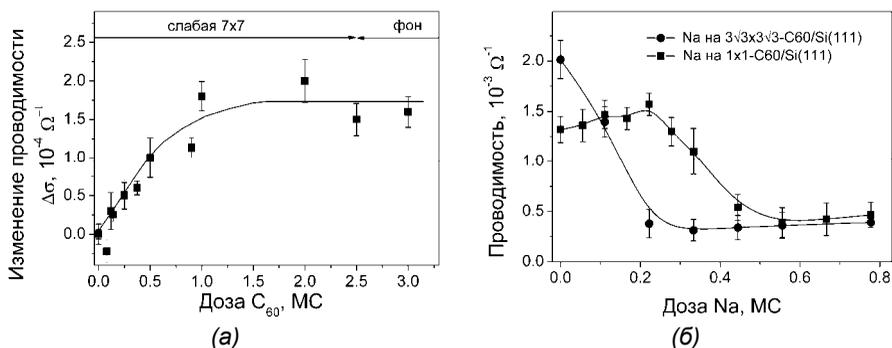


Рисунок 8 – (а) Изменения поверхностной проводимости подложки (а) после осаждения фуллеренов  $C_{60}$  на поверхность  $Si(111)7 \times 7$  при комнатной температуре, (б) после осаждения натрия на поверхность  $Si(111)-h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(Au,Na)$  с предварительно адсорбированными 1 МС и 3 МС фуллеренов со структурой поверхности плёнки  $3\sqrt{3} \times 3\sqrt{3}$  и  $1 \times 1$ , соответственно.

соответственно, изменений проводимости после осаждения фуллеренов не наблюдается. Тем не менее, установлено, что слой фуллеренов при адсорбции на него сверху атомов золота, серебра или натрия сдвигает их влияние на свойства поверхности в области более высоких покрытий. Так, например, при адсорбции серебра максимальное значение проводимости (пик проводимости) для поверхности  $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}-Ag$  достигается раньше, чем для поверхности  $C_{60}/Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}-Ag$  (при покрытии адсорбата 0,1 и 0,5 МС, соответственно). Сделан вывод о том, что при взаимодействии с прибывающими атомами серебра фуллерены как акцепторы электронов, принимают на себя носители заряда, которые эти адатомы могли бы отдать в зону поверхностных состояний.

Показано, что адсорбция натрия на поверхность фуллереновой плёнки приводит к формированию сверхтонкой плёнки фуллерида  $Na_xC_{60}$ . На рисунке 8б представлены результаты измерения проводимости подложки  $Si(111)-h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(Au,Na)$  с предварительно осаждёнными 1 МС и 3 МС фуллеренов со структурой поверхности плёнки  $3\sqrt{3} \times 3\sqrt{3}$  и  $1 \times 1$ , соответственно. Видно, что в случае с поверхностью плёнки  $1 \times 1$  наблюдается незначительное повышение проводимости при дозе натрия 0,2-0,3 МС. Если учесть, что около 0,1 МС натрия уже присутствовало на поверхности  $Si(111)-h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(Au,Na)$ , то стехиометрический состав такой плёнки соответствует отношению 1:1, то есть фуллерида  $NaC_{60}$  [24]. При дальнейшей адсорбции натрия начинается полимеризация, а затем и разрушение фуллерида, в результате чего проводимость уменьшается. Кроме того, наблюдения изменений проводимости показали, что при увеличении толщины предварительно осаждённого фуллеренового

слоя до 6 МС возможно формирование сверхтонкого слоя фуллерида  $\text{Na}_2\text{C}_{60}$  при дозе натрия около 2 МС.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика исследования влияния поверхностных реконструкций и наноструктур на реконструированной поверхности кремния на поверхностную проводимость подложек Si(100) и Si(111) в условиях сверхвысокого вакуума.
2. Систематически исследовано влияние поверхностных реконструкций адсорбатов на монокристаллической подложке кремния на её поверхностную проводимость. Установлено, что формирование поверхностных фаз Si(100)c(8×2)-Au, Si(100)5×1-Au, Si(100)√26×3-Au, Si(100)c(4×12)-Al, Si(111)5×2-Au, Si(111)√3×√3-Au, Si(111)√3×√3-Ag, Si(111)5,55×5,55-Cu, Si(111)4×1-In, Si(111)√7×√3-In приводит к увеличению поверхностной проводимости подложки (до  $(8,4 \pm 0,2) \times 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}/\square$  для поверхностной фазы Si(111)5,55×5,55-Cu относительно атомарно-чистой подложки Si(111)7×7). Продемонстрировано, что поверхностные фазы формируют дополнительные каналы проводимости на поверхности подложки, транспорт носителей в которых осуществляется в направлении вдоль поверхности. Установлено, что поверхностная фаза Si(100)2×3-Na демонстрирует меньшую проводимость, чем поверхностная фаза атомарно-чистой поверхности подложки Si(100)2×1, что связано с большим количеством дефектов (доменных границ и ступеней) поверхности данной фазы, обнаруженных методом сканирующей туннельной микроскопии. При этом было показано, что сглаживание поверхности Si(100)2×3-Na методом титрования путём предварительной адсорбции кремния приводит к увеличению поверхностной проводимости подложки.
3. Установлено, что подложки с поверхностной фазой с анизотропной кристаллической структурой, например, Si(111)4×1-In, или система нанопроволок меди на реконструированной поверхности Si(111)5,55×5,55-Cu, демонстрируют анизотропию поверхностной проводимости. При этом для реконструкции Si(111)4×1-In поверхностная проводимость в направлении вдоль атомарных цепочек выше, чем в других кристаллографических направлениях. Поверхностная фаза Si(111)√3×√3-In с «квазиоднодоменной» структурой также демонстрирует анизотропию поверхностной проводимости при температуре 150 К. Для нанопроволок меди на поверхности Si(111)5,55×5,55-Cu при покрытии меди 15 МС проводимость в направлении вдоль нанопроволок выше, чем в перпендикулярном направлении в 4,8 раза. Установлен металлический характер

проводимости медных нанопроволок, а их удельное сопротивление оценивается как 8 мкОм·см.

4. Установлено влияние адсорбции атомов золота, сурьмы, алюминия, а также экспозиции в атмосфере молекулярного кислорода и атомарного водорода на электрическую проводимость реконструированной поверхности подложек Si(100) и Si(111) при комнатной температуре. Показано, что разупорядочение кристаллической структуры поверхностной реконструкции приводит к уменьшению электрической проводимости подложек при условии, что адсорбция не приводит к формированию упорядоченной структуры на поверхности, как в случае с реконструкцией Si(100)2×2-A1.
5. Проведена оценка стабильности кристаллической структуры поверхностных фаз и их электрической проводимости при осаждении на них аморфного кремния при комнатной температуре. Показано, что стабильность кристаллической структуры поверхностных фаз зависит от её состава: если поверхностная фаза состоит из атомов адсорбата и атомов кремния, то её кристаллическая структура не разрушается, соответственно, поверхностная проводимость при осаждении до 3 МС кремния не изменяется; если в состав поверхностной фазы входят только атомы адсорбата, такая поверхностная фаза разрушается при осаждении кремния, а её проводимость при этом уменьшается.
6. Предложен способ формирования однодоменных поверхностных фаз путем разгонки атомов адсорбата из предварительно напыленной полоски из атомов адсорбата (направленная поверхностная диффузия). Механизм диффузии и способ измерения электропроводности однодоменных поверхностных фаз отработаны на системе Au/Si(111). Установлено, что электропроводность однодоменной поверхностной фазы Si(111)5×2-Au выше, чем электропроводность такой же поверхностной фазы, но с трехдоменной кристаллической структурой.
7. Показано, что удаление доменных границ реконструкции Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au при адсорбции 0.15 МС индия при температуре 600°C или 0,1 МС натрия при 350°C приводит к увеличению проводимости исходной поверхности из-за формирования гомогенной поверхности Si(111)- $h$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Au,In) и Si(111)- $h$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Au,Na), соответственно. Данный эффект достигается за счёт двух факторов: уменьшения плотности доменных границ поверхности, на которых происходит рассеяние носителей заряда, а также обнаруженного методом ФЭСУР увеличения плотности заряда в зоне S<sub>1</sub> поверхностных состояний. Кроме того, было показано, что на начальной стадии адсорбции индия (до ~0,7-0,8 МС) на поверхность Si(111)- $h$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Au,In) при комнатной температуре электрическая проводимость подложки возрастает, что связано с

дополнительным легированием зоны поверхностных состояний, а затем возвращается к исходному значению из-за рассеяния носителей на островках адсорбата. В то время как адсорбция натрия на поверхность  $\text{Si}(111)\text{-}h\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-}(\text{Au,Na})$  при комнатной температуре, наоборот, уменьшает проводимость из-за исчезновения плотности состояний в зоне  $S_1$ .

8. Изучена связь проводимости и морфологии поверхности  $\text{Si}(100)\text{c}(4\times 12)\text{-Al}$  после осаждения на неё до 1 МС индия как при комнатной температуре, так и после прогрева при  $450^\circ\text{C}$ . Показано, что образование островков индия на фазе  $\text{Si}(100)\text{c}(4\times 12)\text{-Al}$  приводит к уменьшению поверхностной проводимости из-за рассеяния на них носителей заряда. Установлено, что после отжига такого образца при  $450^\circ\text{C}$  концентрация островков на поверхности уменьшается, и рассеяние на них носителей заряда перестает играть существенную роль в поверхностной проводимости.
9. Исследована электрическая проводимость подложки кремния с поверхностной фазой  $\text{Si}(111)\sqrt{21}\times\sqrt{21}\text{-}(\text{Au,Ag})$ . Обнаружено, что в зависимости от соотношения количеств золота и серебра в данной поверхностной фазе проводимость такой подложки различается. Анализ поведения проводимости поверхности  $\text{Si}(111)\sqrt{21}\times\sqrt{21}\text{-}(\text{Au,Ag})$  при адсорбции серебра свидетельствует о влиянии слоя пространственного заряда в приповерхностной области подложки на результаты измерений. Показано влияние фазовых переходов в бинарной системе  $(\text{Au,Ag})/\text{Si}(111)$  на поверхностную проводимость. Установлено, что адсорбция 0,1 МС серебра на поверхность  $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$  при  $350^\circ\text{C}$  приводит к формированию реконструкции  $\text{Si}(111)\sqrt{93}\times\sqrt{93}\text{-}(\text{Au,Ag})$  и увеличению проводимости подложки, а дальнейшая адсорбция до 0,25 МС серебра приводит к формированию упорядоченной структуры  $\text{Si}(111)2\sqrt{3}\times 2\sqrt{3}\text{-}(\text{Au,Ag})$  и, соответственно, уменьшению проводимости из-за формирования слоя обеднённого заряда в приповерхностной области подложки.
10. Установлено, что адсорбция около 1 МС золота на поверхность  $\text{Si}(100)2\times 1$  при комнатной температуре приводит к повышению проводимости подложки благодаря формированию металлической плёнки, удельная проводимость которой оценивается как  $(5,1\pm 1,7)\cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ , что существенно меньше, чем проводимость объёмного золота из-за наличия дефектов и размерного эффекта. При этом установлено, что морфология плёнки золота с покрытием адсорбата до 4 МС и, соответственно, её проводимость зависят от свойств поверхности подложки, на которой она формируется. Показано, что при формировании плёнок золота на реконструированной поверхности  $\text{In}/\text{Si}(111)$  наиболее гладкая морфология и, соответственно, наиболее высокая проводимость наблюдается для плёнок золота на реконструкциях  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-In}$  и  $\text{Si}(111)\sqrt{7}\times\sqrt{3}\text{-In}$ .

Продемонстрировано, что адсорбция более 4 МС золота на реконструированную поверхность Si(111)5,55×5,55-Cu при комнатной температуре приводит к формированию плёнки золота с улучшенными характеристиками (морфология поверхности, электрическая проводимость) по сравнению с плёнкой золота, сформированной на атомарно-чистой поверхности Si(111)7×7. При этом было установлено, что адсорбция более 3 МС золота на реконструкцию Si(111)5,55×5,55-Cu приводит к формированию плёнки, устойчивой к окислению, что подтверждается измерениями проводимости.

11. Показано, что 1-2 монослоя фуллеренов C<sub>60</sub>, предварительно осаждённых на поверхности Si(111), исполняют роль акцепторов избыточного заряда для адсорбированных атомов золота, серебра и натрия. Такое взаимодействие молекул фуллерена с адсорбированными атомами металла приводит к тому, что слой объёмного заряда в приповерхностной области подложки с фазой Si(111)- $\alpha$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au остаётся обогащённым носителями и не изменяет проводимость подложки на начальной стадии адсорбции золота (менее 0,5 МС). В случае поверхности Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag заполнение зоны S<sub>1</sub> поверхностных состояний происходит при более высоком покрытии адсорбированного серебра (~0,5 МС). Продемонстрировано, что при осаждении натрия на поверхность Si(111)- $h$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Au,Na), предварительно покрытую 6 МС фуллеренов, на подложке Si(111) возможно формирование сверхтонких плёнок фуллеридов NaC<sub>60</sub> и Na<sub>2</sub>C<sub>60</sub>.

### Список литературы

- 1 Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits // Electronics. – 1965. – V. 38, №8. – P. 114-117.
- 2 ITRS. International technology roadmap for semiconductors, 2011 edition, 2011. URL <http://www.itrs.net>.
- 3 Iwai H. Roadmap for 22 nm and beyond // Microelectronic Engineering. – 2009. – V. 86, No. 7-9. – P. 1520-1528.
- 4 Zhirnov V.V., Cavin R.K., Hutchby J.A., Bourianoff G.I. Limits to binary logic switch scaling - a gedanken model // Proceedings of the IEEE. – 2003. – V. 91, No. 11. – P. 1934-1939.
- 5 Lifshits V.G., Saranin A.A., Zotov A.V. Surface Phases on Silicon: Preparation, Structure and Properties. – Chichester: John Wiley & Sons, 1994. – 450 p.
- 6 Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. – М.: Наука, 2006 г. – 490 с.
- 7 Lüth H. Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films. – Berlin: Springer, 2001. – 559 p.
- 8 Mönch W. Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films. – Berlin: Springer, 1995. – 442 p.

- 9 Bauerle F., Mönch W., Henzler M. Correlation of electronic surface properties and surface structure on cleaved silicon surfaces // *J. Appl. Phys.* – 1972. – V. 43, №10. – P. 3917-3919.
- 10 Hasegawa S., Jiang C.-S., Tong X., Nakajima Y. Electrical functional properties of surface superstructures on semiconductors // *Adv. Coll. Interf. Sci.* – 1997. – V. 71-72. – P. 125-145.
- 11 Tsoukanov D.A., Ryzhkov S.V., Gruznev D.V., Lifshits V.G. The role of the surface phases in surface conductivity // *Appl. Surf. Sci.* – 2000. – T. 162-163. – C. 168–171.
- 12 Crommie M.F., Lutz C.P., Eigler D.M. Imaging standing waves in a two-dimensional electron gas // *Nature.* – 1993. – V. 363. – P. 524-527.
- 13 Hasegawa S., Tong X., Takeda S., Sato N., Nagao T. Structures and electrical transport on silicon surfaces // *Prog. Surf. Sci.* – 1999. – V. 60, № 5-8. – P. 89-257.
- 14 Hofmann Ph., Wells J.W. Surface sensitive conductance measurements // *J. Phys.: Condens Matter.* – 2009. – V. 21. – P. 013003.
- 15 Batra I.P. Atomic and electronic structure of the Na/Si(100)-(2×1) surface // *Phys. Rev. B.* – 1989. – V. 39, № 6. – P. 3919-3922.
- 16 Гантмахер В.Ф., Левинсон И.Б. Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках: Наука, ФМЛ.- 1984.- с. 352.
- 17 Schulze G., Henzler M. Adsorption of atomic hydrogen on clean cleaved silicon (111) // *Surf. Sci.* – 1983. – V. 124, No. 2-3. – P. 336-350.
- 18 Nagao T., Voges C., Pfnuer H., Henzler M., Ino S., Shimokoshi F., Hasegawa S. Diffraction from small antiphase domains:  $\alpha$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au,  $\beta$ - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au,  $6\times 6$ -Au phases of Au adsorbed Si(111) // *Appl.Surf.Sci.* – 1998. – V 130-132. – P. 47 – 53.
- 19 Gruznev D.V., Filippov I.N., Olyanich D.A., Chubenko D.N., Kuyanov I.A., Saranin A.A., Zotov A.V., Lifshits V.G. Si(111)- $\alpha\sqrt{3}$ -Au phase modified by In adsorption: Stabilization of a homogeneous surface by stress relief // *Phys. Rev. B.* – 2006. – V. 73. – P. 115335 – 1-7.
- 20 Kim J.K., Kim K.S., McChesney J.L., Rotenberg E., Hwang H.N., Hwang C.C., Yeom H.W. Two-dimensional electron gas formed on the indium-adsorbed Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au surface // *Phys. Rev. B.* – 2009. – V. 80, No. 7. – p. 075312 – 1-7.
- 21 Matsuda I., Kubo K., Hirahara T., Yamazaki S., Choi W.H., Yeom H.W., Narita H., Fukaya Y., Hashimoto M., Kawasuso A., Hasegawa S., Kobayashi K. Electron compound nature in a surface atomic layer of two-dimensional hexagonal lattice // *Phys. Rev. B.* – 2010. – V. 82. – P. 165330 – 1-6.
- 22 Okino H., Matsuda I., Tanikawa T., Hasegawa S. Formation of facet structures by Au adsorption on vicinal Si(111) surfaces // *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* – 2003. – V. 1. – P. 84-90.
- 23 Matetskiy A.V., Gruznev D.V., Zotov A.V., Saranin A.A. Modulated C<sub>60</sub> monolayers on Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au reconstructions // *Phys. Rev. B.* – 2011. – V. 83. – P. 195421 – 1-7.
- 24 Stepniak F., Benning P.J., Poirier D.M., Weaver J.H. Electrical transport in Na, K, Rb, and Cs fullerides: Phase formation, microstructure, and metallicity // *Phys. Rev. B.* – 1993. – V. 48, No. 3. – P. 1899-1906.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых периодических изданиях<sup>1</sup>

1. Lifshits V.G., Gavriluk Yu.L., Zotov A.V., Tsukanov D.A. *Si Surface Phases: Formation, Role in Processes and Properties* // **Physics of Low-Dimensional Structures**. – 1997. – V. 1/2. – P. 131 - 138.
2. Ryzhkov S.V., Tsukanov D.A., Lifshits V.G. *Surface Conductivity of Ultra-Thin Na and Au Films on Si(100)* // **Physics of Low-Dimensional Structures** – 1998. – V. 7/8. – P. 1 - 6.
3. Ryzhkov S.V., Tsukanov D.A., Gruznev D.V., Lifshits V.G. *Study of Electrical Properties of Ultra-Thin Na Films on Si(100)* // **Physics of Low-Dimensional Structures**. – 1998. – V. 7/8. – P. 109 - 116.
4. Saranin A.A., Zotov A.V., Ryzhkov S.V., Tsukanov D.A., Lifshits V.G., Ryu J.-T., Kubo O., Tani H., Harada T., Katayama M., Oura K. *Si(100)2x3-Na surface phase: Formation and atomic arrangement* // **Physical Review B**. – 1998. – V. 58. – P. 4972-4976.
5. Saranin A.A., Zotov A.V., Ryzhkov S.V., Tsukanov D.A., Lifshits V.G., Ryu J.-T., Kubo O., Tani H., Harada T., Katayama M., Oura K. *Scanning tunneling microscopy study of 7x7-to-3x1 transformation induced on Si(111) surface by Na adsorption* // **Physical Review B**. – 1998. – V. 58. – P. 7059 - 7063.
6. Tsukanov D.A., Ryzhkov S.V., Hasegawa S., Lifshits V.G. *Surface Conductivity of Submonolayer Au/Si(100) System* // **Physics of Low-Dimensional Structures**. – 1999. – V. 7/8. – P. 149 - 154.
7. Tsukanov 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.
8. Лифшиц В.Г., Гаврилюк Ю.Л., Саранин А.А., Зотов А.В., Цуканов Д.А. *Поверхностные фазы на кремнии* // **Успехи физических наук**. – 2000. – Т. 170, № 5. – С. 569-571.
9. Лифшиц В.Г., Азатьян С.Г., Гаврилюк Ю.Л., Луняков Ю.В., Саранин А.А., Зотов А.В., Цуканов Д.А. *Двумерные структуры на поверхности кремния* // **Известия Академии Наук. Серия физическая**. – 2001. – Т. 65, № 2. – С. 176-179.
10. Белоус И.А., Утас О.А., Цуканов Д.А., Лифшиц В.Г. *Измерение электрической проводимости поверхностных фаз на кремнии четырехзондовым методом in situ*, **Приборы и техника эксперимента**. – 2001. – № 5. – С. 134-136.
11. Tsukanov D.A., Ryzhkov S.V., Utas O.A., Belous I.A., Lifshits V.G. *Influence of Surface Phases on Electrical Conductivity of Silicon Surface* in: *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*, Editors: V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin. World Scientific Publishing Company, Singapore. – 2001. – P. 184-189.
12. Ryzhkov S.V., Saranin A.A., Zotov A.V., Tsukanov D.A., Utas O.A., Belous I.A., Katayama M., and Hasegawa S., Oura K., Lifshits V.G. *Si(100)2x3-Na surface phase*

---

<sup>1</sup> Полужирным шрифтом выделены издания, входящие в перечень ВАК РФ

- formation and surface conductivity // Physics of Low-Dimensional Structures.* – 2001. V. 11. – P. 131-142.
13. Saranin A.A., Ryzhkov S.V., Tsukanov D.A., Lifshits V.G., Zotov A.V., Oura K., Hasegawa S. *Surface Phases of Metals on Silicon as Material for Surface Engineering // MRS Proceedings.* – 2002. – V. 697. – P. 207-212.
  14. Tsukanov D.A., Ryzhkov S.V., Belous I.A., Utas O.A., Lifshits V.G. *Electrical conductivity of surface phases on silicon // Proceedings of SPIE.* – 2003. - V. 5129. - P. 295-304.
  15. Lifshits V.G., Gavriilyuk Y.L., Tsukanov D.A., Churusov B.K., Enebish N., Kuznetsova S.V., Ryjkov S.V., Gruznev D., Tatsuyama C. *Surface Phases and Processes on Si Surface // e-Journal of Surface Science and Nanotechnology.* – 2004. – V. 2. – P. 56-76.
  16. Tsukanov D.A., Ryjkov S.V., Utas O.A., Lifshits V.G. *The formation of Si(111)5x2-Au single-domain surface phase // Applied Surface Science.* – 2004. – V. 234. – P. 297-301.
  17. Ryjkov 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.
  18. Лифшиц В.Г., Чурусов Б.К., Гаврилюк Ю.Л., Энебиш Н., Котляр В.Г., Кузнецова С.В., Рыжков С.В., Цуканов Д.А. *Поверхностные фазы и наноструктуры на поверхности кремния // Журнал структурной химии.* – 2004. - Т. 45, Приложение. – С. 37-60.
  19. Лавринайтис М.В., Грузнев Д.В., Цуканов Д.А., Рыжков С.В. *Исследование электрической проводимости поверхностной фазы Si(100)c(4x12)-Al при напылении In и Al // Письма в журнал технической физики.* – 2005. – Т. 31, Вып. 24. - С. 67-73.
  20. Лавринайтис М.В., Рыжков С.В., Цуканов Д.А., Грузнев Д.В., Лифшиц В.Г. *Исследование влияния структуры, состава и морфологии поверхностных фаз на электрическую проводимость поверхности кремния // Вестник Дальневосточного отделения РАН.* – 2005. - № 6, Приложение. – С. 49-56.
  21. Цуканов Д.А., Грузнев, Д.В., Лавринайтис М.В. *Исследование кристаллической структуры и электрических свойств поверхностных фаз металлов на кремнии // Вестник Дальневосточного отделения РАН.* – 2006. - № 4. - С. 100-102.
  22. Лавринайтис М.В., Цуканов Д.А., Рыжков С.В. *Анизотропия электрической проводимости поверхностных фаз In-Si(111) // Письма в журнал технической физики.* – 2007. - Т. 33, Вып. 11. - С. 20-24.
  23. 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)'5x5'-Cu surface // Nanotechnology.* – 2008. – V. 19, No. 24. - P. 245608-1 – 245608-5.
  24. Zotov A.V., Saranin A.A., Gruznev D.V., Цуканов Д.А. *Как вырастить нанопроволоку? Самоорганизация металлических нанопроволок на поверхности монокристаллического кремния // Природа.* – 2009. - № 6. - С. 26-34.
  25. 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.

26. Цуканов Д.А., Бондаренко Л.В., Борисенко Е.А. *Стабильность электрических характеристик пленок Au на поверхности Si(111)5,55×5,55-Си при экспозиции в кислороде* // **Письма в журнал технической физики**. – 2010. - Т. 36, Вып. 19. - С. 1-7.
27. Бондаренко Л.В., Цуканов Д.А., Борисенко Е.А., Грузнев Д.В., Матецкий А.В., Зотов А.В., Саранин А.А. *Электрическая проводимость системы (Au,In)/Si(111)* // **Труды МФТИ**. – 2011. - Т. 3, № 2. - С. 3-9.
28. Gruznev D.V., Matetskiy A.V., Bondarenko L.V., Borisenko E.A., Tsukanov D.A., Zotov A.V., Saranin A.A. *Structural transformations in (Au,In)/Si(111) system and their effect on surface conductivity* // **Surface Science**. - 2011. – V. 605. - P. 1420-1425.
29. 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 C<sub>60</sub> layer on the growth mode and conductance of Au and Ag films on Si(111) $\sqrt{3}$ -Au and Si(111) $\sqrt{3}$ -Ag surfaces* // **Journal of Applied Physics**. – 2011. – V. 110, No. 9. – P. 093704-1 – 093704-5.
30. Tsukanov D.A., Ryzhkova M.V., Borisenko E.A., Bondarenko L.V., Matetskiy A.V., Gruznev D.V., Zotov A.V., Saranin A.A. *Surface conduction at phase transitions in (Au,Ag)/Si(111) submonolayer films* // **Applied Surface Science**. – 2012. – V. 258, No. 24. – С. 9636-9641.
31. 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**

32. 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.
33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009613648 от 8.07.2009 г. *Измерение четырехзондовым методом электрической проводимости подложек кремния* // Цуканов Д.А., Рыжков С.В., Рыжкова М.В., Белоус И.А.
34. 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.

Цуканов Дмитрий Анатольевич

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ НАНОСТРУКТУР  
НА РЕКОНСТРУИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КРЕМНИЯ

Автореферат

Подписано к печати

Усл. п.л. 2 Уч.-изд. л. 1,7 Формат 60×84/16

Тираж 100. Заказ

---

Издано ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5

Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН

г. Владивосток, ул. Радио, д. 5