

На правах рукописи

**РЫЖКОВА Мария Валерьевна**

**Исследование электрической проводимости наноструктур, образованных  
адсорбатами I, III групп на поверхности кремния**

**01.04.10 - физика полупроводников**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Владивосток - 2008

Работа выполнена в Институте автоматике и процессов управления  
Дальневосточного отделения РАН

Научный руководитель - доктор физико-математических наук  
профессор Андрей Вадимович Зотов

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук  
профессор Николай Геннадиевич Галкин  
кандидат физико-математических наук  
Алексей Вячеславович Огнев

Ведущая организация Институт материаловедения  
Хабаровского научного центра,  
г. Хабаровск

Защита состоится " 29 " декабря 2008 года в 10 часов на заседании  
диссертационного совета Д 005.007.02 при Институте автоматике и процессов  
управления ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5, ИАПУ  
ДВО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки  
Института автоматике и процессов управления ДВО РАН.

Автореферат разослан " 14 " ноября 2008 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

к. т. н., доцент



Е.Л. Гамаюнов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Исследование поверхности твердых тел представляется важной задачей в фундаментальной науке, а также с точки зрения возможности создания принципиально новых полупроводниковых приборов. Это связано с тем, что при уменьшении размеров полупроводниковых элементов микросхем процессы на поверхности играют все большую роль в их электрофизических характеристиках. Известно, что на поверхности монокристаллов в сверхвысоком вакууме формируются такие поверхностные структуры как поверхностные фазы [1], которые обладают уникальными свойствами - самоорганизация, собственная кристаллическая и электронная структура и прочее. Поверхность кремния весьма привлекательный объект для научных исследований, благодаря широкому применению в полупроводниковых приборах в интегральных микросхемах, поэтому наноструктуры, такие как островки, нанопроволоки, поверхностные фазы, сформированные на поверхности монокристаллического кремния, вызывают пристальный интерес исследователей во всем мире.

В последние годы на исследования в области наноструктур обратили внимание и на государственном уровне. Для этого в 2007 был образован правительственный совет по нанотехнологиям [2].

К настоящему времени уже относительно много работ посвящено исследованию корреляции электрической проводимости поверхностных наноструктур с их атомарной и кристаллической структурой, например [3, 4]. Результаты, полученные экспериментальным путем, свидетельствуют о том, что поверхностные наноструктуры оказывают заметное влияние на электрические свойства образца. Кроме того, различные изменения в структуре и составе отражаются и в поведении электрической проводимости. К настоящему моменту имеется множество публикаций по этой теме, однако данная тема является далеко не исчерпанной, сейчас исследования в этой области находятся в стадии бурного развития, т. к. количество публикаций по

изучению электрической проводимости наноструктур на поверхности в последние годы также резко увеличилось.

В настоящее время многие аспекты электрофизики поверхностных слоев недостаточно изучены как в фундаментальной области, определяемой механизмами переноса заряда и рассеяния в поверхностных и приповерхностных слоях, так и в области практических применений, связанных с возможностью создания на основе поверхностных фаз и других наноструктур на поверхности новых приборов.

Целью диссертационной работы являлось определение электрической проводимости подложек кремния с поверхностными наноструктурами, образованными адсорбатами I, III групп: Ag, In, Cu, Al, Na. Для этого предполагалось решить следующие задачи.

Основные задачи:

1. Сконструировать четырехзондовую приставку для проведения электрических измерений проводимости в условиях сверхвысокого вакуума, разработать методику измерений электрической проводимости поверхностных наноструктур.
2. Исследовать влияние созданных наноструктур (таких как нанопроволоки) на электрическую проводимость образца.
3. Исследовать влияние особенностей (таких как анизотропная структура, дефекты) сформированных поверхностных наноструктур на электрическую проводимость.
4. Исследовать влияние температуры на величину электрической проводимости при охлаждении образца кремния с адсорбатом серебра.
5. Предложить возможные каналы переноса заряда и механизмы рассеяния.
6. Определить степень сохранности поверхностных фаз при формировании сверху слоя аморфного кремния, а также исследовать изменения величины электрической проводимости в таком процессе.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- впервые была исследована электрическая проводимость некоторых систем кремний - адсорбат при формировании сверху субмонослойного покрытия аморфного кремния.

- впервые была исследована анизотропия электрической проводимости поверхностной фазы  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3} - \text{In}$ .

- впервые была исследована электрическая проводимость системы медных нанопроволок, сформированных на ступенях поверхности  $\text{Si}(111)5,55\times 5,55 - \text{Cu}$ .

- впервые исследовано влияние, которое оказывает наличие островков адсорбата на электрическую проводимость образца с поверхностной фазой  $\text{Si}(100)c(4\times 12) - \text{Al}$ .

- предложен механизм рассеяния носителей заряда для системы с точечными дефектами на поверхности.

Практическая ценность.

Были получены качественные и количественные зависимости электрических характеристик образцов с поверхностными нанобъектами от их структуры.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для получения заданных электрофизических параметров различных наноструктур на поверхности кремния.

Было показано, что сформированные нанопроволоки меди обладают относительно большой проводимостью, что может быть использовано при создании соединений между элементами микросхемы на поверхности.

Результаты исследований - еще один этап на пути к созданию новых двумерных элементов интегральных микросхем нанометрового размера, таких как двумерный диод, транзистор, трехмерные микроэлектронные структуры с захороненными поверхностными фазами и т.д.

22.11.07 в ФИПС отправлена заявка на изобретение «Способ создания проводящих нанопроволок на поверхности полупроводниковых подложек». Номер приоритета заявки № 2007.143736 от 26.11.07.

На защиту выносятся основные результаты диссертационной работы:

- Наблюдается анизотропия электрической проводимости поверхностных фаз  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-In}$  и  $\text{Si}(111)4\times 1\text{-In}$ . Установлено, что направления, в которых проводимость максимальна, совпадают с направлениями максимальной атомной плотности в поверхностной фазе  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-In}$ . В поверхностной фазе  $\text{Si}(111)4\times 1\text{-In}$  направления, в которых наблюдаются максимумы проводимости, совпадают с направлениями одномерных цепочек индия.

- Наблюдается анизотропия электрической проводимости образца с системой нанопроволок меди, сформированной на ступенях поверхности с поверхностной фазой  $\text{Si}(111)5,55\times 5,55\text{-Cu}$ . Установлено, что направления, в которых проводимость максимальна, совпадают с направлениями, в которых ориентированы полосы меди. Электрическое сопротивление нанопроволок составляет  $\sim 8$  мкОм·см, эта величина является одной из самых малых для нанобъектов такого типа.

- Охлаждение поверхностных фаз  $\text{Si}(111)7\times 7$ ,  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Ag}$  и системы с монослоем серебра на поверхности  $\text{Si}(111)$  приводит к увеличению значения проводимости при понижении температуры образца.

- Наблюдается различная величина стабильности поверхностных фаз по отношению к формированию сверху слоя аморфного кремния. Поверхностные фазы, состоящие только из атомов адсорбата, разрушаются при напылении сверху слоя кремния. Поверхностные фазы, в состав которых входят не только атомы адсорбата, но и атомы подложки кремния, не разрушаются при напылении сверху кремния.

- Такой процесс сопровождается уменьшением величины проводимости для поверхностных фаз, которые не сохраняют свою структуру при напылении кремния, тогда как стабильные поверхностные фазы характеризуются

постоянной величиной проводимости в течение всего процесса формирования слоя аморфного кремния.

- Формирование островков алюминия или индия на поверхностной фазе Si(100)c(4x12) – Al приводит к уменьшению электрической проводимости образца. Величина, на которую упало значение проводимости, коррелирует с количеством сформированных островков.

#### Апробация результатов работы.

Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях:

1) Россия, Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, 2001, Региональная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов,

2) Russia, Vladivostok, 2002, the Fifth Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces September,

3) Россия, Санкт-Петербург, 2002, IV Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике,

4) Japan, Nara, 2003, the 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures,

5) Россия, Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, 2003, Четвертая региональная научная конференция «Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование»,

6) Россия, Владивосток, ИФИТ ДВГУ, 2005, Региональная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике,

7) Россия, Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, 2005, Девятая региональная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов,

8) Russia, Vladivostok, 2006, VII Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces,

9) Россия, Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, 2006, Десятая региональная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов.

10) Россия, Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, 2007, XI конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов,

11) Russia, Novosibirsk, 2007, 15th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”.

12) Russia, Vladivostok, 2008, 16th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”.

#### Публикации.

По теме диссертации опубликованы 6 статей в реферируемых научных журналах. Опубликовано 12 тезисов докладов, а также 6 статей в трудах конференций, которые были представлены на всероссийских, международных и региональных конференциях и семинарах.

#### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 127 страниц, включая 54 рисунка, 8 таблиц и списка литературы из 130 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении показана актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и задачи работы, основные защищаемые положения, научная и практическая значимость работы.

Первая глава носит обзорный характер и раскрывает современное состояние изложенных в диссертации вопросов. Основное внимание уделяется экспериментальным работам, уже имеющимся к моменту начала работы над



диссертацией по исследованию электрической проводимости наноструктур, сформированных на поверхности кремния.

В первом разделе представлены сведения о кристаллической структуре и основные данные по электронным свойствам поверхностных фаз чистого кремния Si(111)7x7 и Si(100)2x1.

Во втором разделе первой главы показаны наиболее важные для данной диссертации литературные данные по исследованиям в области электрической проводимости поверхностных наноструктур (анизотропия; изменения проводимости при различных процессах на поверхности: изменение температуры образца, структурные перестройки поверхности; изменение величины проводимости при наличии дефектов на поверхности; и измерение проводимости нанообъектов).

Можно отметить, что данная область исследована недостаточно. В мире подобными исследованиями в настоящее время занимаются лишь несколько научных групп. Электрические свойства многих поверхностных наноструктур до сих пор не исследовались.

Вторая глава содержит описание экспериментальной установки. В первом разделе этой главы приводятся методы получения атомарно чистой поверхности и описание сверхвысоковакуумной установки. Все эксперименты проводились на сверхвысоковакуумной установке, оборудованной прецизионным манипулятором, на котором размещаются кремниевый образец. Камера оснащена электронной оптикой ДМЭ для наблюдения кристаллической структуры поверхностных фаз. Для проведения электрических измерений *in situ* была изготовлена четырехзондовая приставка на выдвижном манипуляторе. Конструкция камеры позволяла устанавливать источники серебра, алюминия, натрия, кремния, индия и меди.

Во втором разделе второй главы приведены общие положения методов ДМЭ и четырехзондового метода измерения удельного сопротивления и проводимости полупроводников. Отмечается, что ДМЭ является одним из

самых удобных методов, позволяющих изучать кристаллическую структуру поверхностных фаз, а также отслеживать процесс разрушения структуры упорядоченных поверхностных фаз. Четырехзондовый метод - один из самых эффективных методов для измерения удельного сопротивления и проводимости монокристаллического кремния, который позволяет отслеживать изменения проводимости даже для таких сверхтонких структур на поверхности, как поверхностные фазы, что и показывают экспериментальные данные, приведенные в настоящей работе. В этом же разделе кратко описаны методы сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и дифракции отраженных быстрых электронов (ДОБЭ). Результаты, полученные этими методами, также использовались в работе.

Третья глава представляет результаты экспериментов по исследованию изменений величины электрической проводимости при охлаждении образца, а также при формировании дефектов на поверхности.

В первом разделе третьей главы приводятся результаты экспериментов по исследованию электрической проводимости поверхностной фазы чистого кремния  $\text{Si}(111)7\times 7$ , а также систем со слоем аморфного серебра, сформированного на поверхности кремния и поверхностной фазы  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Ag}$ . При охлаждении таких образцов во всех трех случаях наблюдалось увеличение величины электрической проводимости (рис. 1), что можно объяснить уменьшением рассеяния носителей заряда на колебаниях решетки. Однако скорость увеличения проводимости с понижением температуры неодинакова, так для поверхностной фазы  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Ag}$  наблюдается самое сильное увеличение электрической проводимости, тогда как электрическая проводимость системы со слоем аморфного серебра увеличивалась в меньшей степени. Было сделано предположение что, такое поведение проводимости объясняется тем, что рассеяние носителей заряда в поверхностной фазе меньше, чем в системе с таким же количеством серебра, но в виде аморфной пленки. Изменение электрической проводимости

поверхностной фазы Si(111)7×7 при понижении температуры образца изучалось неоднократно. Данные [4] свидетельствуют о том, что данная поверхностная фаза по своей зонной структуре является металлической, однако при этом дает крайне малый вклад в проводимость из-за малого количества электронов, образующих этот канал проводимости. Основной ток течет в приповерхностной области в объеме полупроводникового кремния. Этим объясняется повышение проводимости при понижении температуры, характерное для кремния в данной области температур.

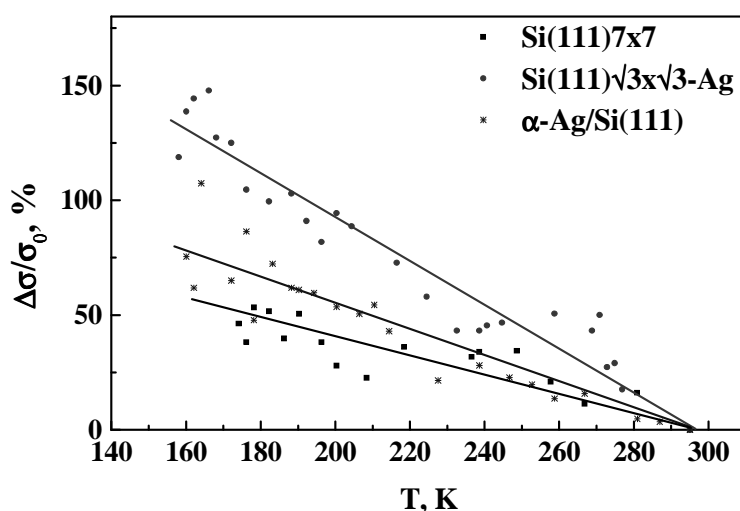


Рис. 1 Проводимость образцов с поверхностями Si(111)√3x√3-Ag, α-Ag/Si(111) и Si(111)7x7 при понижении температуры до 160 К.

Во втором разделе представлены результаты исследований электрической проводимости поверхностной фазы Si(100)c(4×12)-Al в зависимости от количества, сформированных на ней островков алюминия или индия. В данном параграфе исследуется вопрос о механизме рассеяния носителей заряда на дефектах поверхности. Ранее исследовались процессы рассеяния в основном в объеме, поэтому данных о поверхности в этом отношении практически нет.

Уже на самых ранних стадиях напыления In наблюдалось резкое понижение проводимости образца до уровня проводимости образца с чистой поверхностью Si(100)2×1 (рис. 2). В то же время, при напылении индия с последующим отжигом образца при температуре 700 К проводимость

уменьшается в гораздо меньшей степени. При напылении на поверхностную фазу  $\text{Si}(100)\text{c}(4\times 12)\text{-Al}$  атомов алюминия при комнатной температуре также наблюдалось понижение электрической проводимости на начальной стадии напыления адсорбата (рис. 2). Известно, что рост алюминия на поверхностной фазе  $\text{Si}(100)\text{c}(4\times 12)\text{-Al}$  имеет островковый характер. После отжига при 700 К концентрация островков Al уменьшается, а проводимость образца возрастает почти до уровня проводимости начальной фазы  $\text{c}(4\times 12)\text{-Al}$ , как и в случае с напылением In.

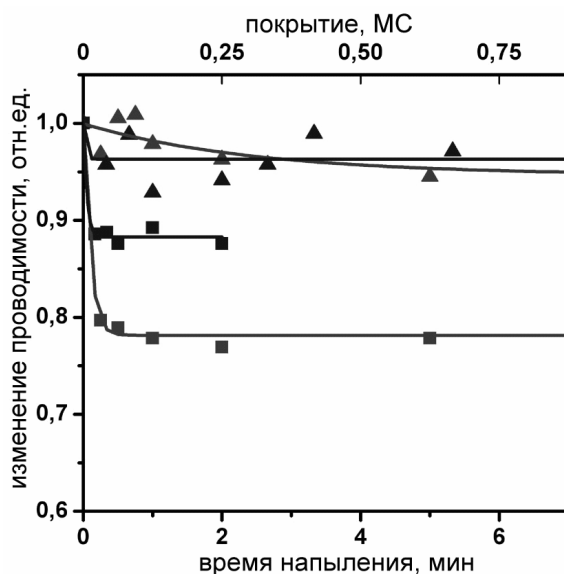


Рис. 2 Зависимость проводимости образца от количества напыленного индия (■) и алюминия (▲) на поверхностную фазу  $\text{Si}(100)\text{c}(4\times 12)\text{-Al}$ . Нулевое значение проводимости соответствует величине проводимости чистого кремния  $\text{Si}(100)2\times 1$ .

Для определения плотности островков, проводились СТМ исследования образцов с островками на поверхностной фазе  $\text{Si}(100)\text{c}(4\times 12)\text{-Al}$ .

Для анализа изменения проводимости образца была использована следующая модель: подложка  $\text{Si}(100)$  с поверхностной фазой  $\text{c}(4\times 12)\text{-Al}$  на которой расположены незаряженные центры рассеяния, образованные островками атомов адсорбата. Причем в изменение проводимости дает вклад только изменение рассеяния на островках адсорбата. Центры рассеяния полагались точечными, т.к. расстояние между ними много больше их размеров. Другие механизмы рассеяния, например на фононах, не дают такого вклада за

счет того, что в обоих случаях измерения проводились при одинаковой (комнатной) температуре. Вклад ступеней в подвижность носителей заряда на поверхности также не учитывался, так как мы полагаем его одинаковым для случаев с отжигом образца и без отжига (используемая в эксперименте температура в 700 К слишком мала для существенной перестройки ступеней на поверхности).

На основе экспериментальных данных и рассчитанной модели можно провести сравнение электрических проводимостей.

*Таблица 1: Сравнение экспериментального и расчетного значения отношения электрических проводимостей.*

адсорбат	плотность островков		отношение проводимостей	
	без отжига	с отжигом	экспериментальное	расчетное
	$N_{0RT}$	$N_{0HT}$		
In	$5 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$	0,81	0,78
Al	$1,4 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{14}$	0,95	0,93

Четвертая глава является продолжением исследований электрической проводимости: в данной главе исследовалась анизотропия электрических свойств наноструктур на поверхности.

В первом разделе исследована зависимость проводимости поверхностных фаз Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In и Si(111)4x1-In от кристаллографических направлений поверхности подложки (рис. 3). Установлено, что направления, в которых проводимость максимальна, совпадают с кристаллографическими направлениями максимальной атомной плотности атомов In в сверхрешетке Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In. Также показано, что направления в поверхностной фазе Si(111)4x1-In, в которых электрическая проводимость максимальна, совпадают с направлениями одномерных цепочек индия.

Так как поверхностная фаза Si(111)4x1-In является трехдоменной, то максимумы проводимости, обусловленные вкладами от всех трех доменов, и, следовательно, пики проводимости, также будут повторяться с периодом в 60°.

В то же время, исходя из моделей кристаллической структуры, следует, что направления максимумов проводимости в системах  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-In}$  и  $\text{Si}(111)4\times 1\text{-In}$  должны различаться на  $30^\circ$ , что и видно из рис. 3.

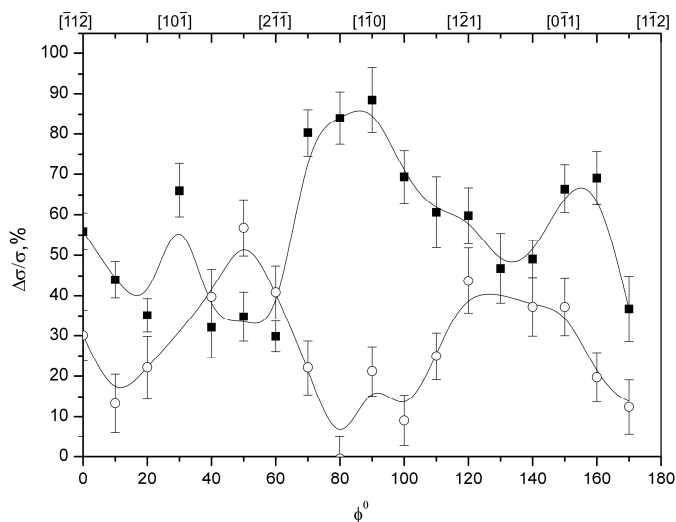
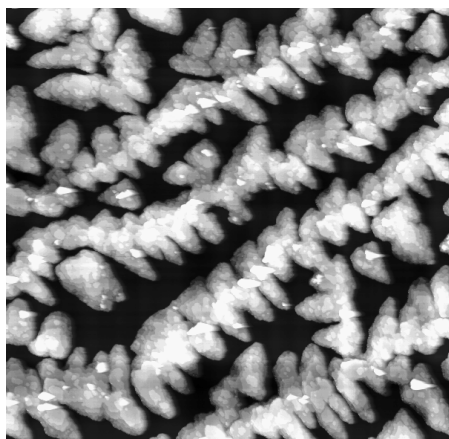


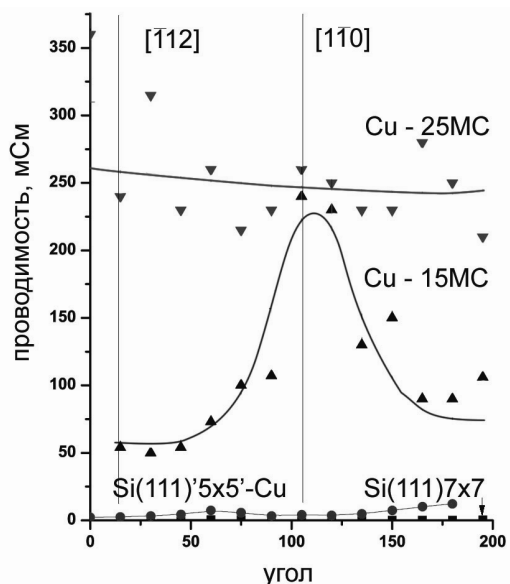
Рис. 3 Изменение электрической проводимости в зависимости от угла поворота зондовой головки.  $\circ$  -  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-In}$ ,  $\blacksquare$  -  $\text{Si}(111)4\times 1\text{-In}$ .

Таким образом, полученные результаты показывают, что электрическая проводимость поверхностных фаз  $\text{Si}(111)\text{-In}$  существенно зависит от кристаллографического направления, в котором производится измерение. Поэтому важно всегда учитывать этот факт при всех исследованиях, связанных с измерением поверхностной проводимости монокристаллических подложек в вакууме.

Во втором разделе четвертой главы приведено описание экспериментальных результатов, полученных при определении анизотропии электрической проводимости системы нанопроволок меди, сформированных на ступенях поверхности с поверхностной фазой  $\text{Si}(111)5,55\times 5,55\text{-Cu}$  (рис. 4).



(a)



(б)

Рис. 4. СТМ изображение нанопроволок меди (покрытие 15 МС) на ступенях поверхности  $Si(111)5,55 \times 5,55$ -Cu (а). Зависимость электрической проводимости от угла поворота зондовой головки при различных покрытиях (б).

Напыление ~ 2-3 МС меди при температуре 550 °С на поверхность образца с поверхностной фазой  $Si(111)7 \times 7$  приводит к образованию силицидной пленки  $Cu_2Si$ . Дальнейшее напыление меди на образованную поверхностную фазу  $Si(111)5,55 \times 5,55$ -Cu приводит к образованию на ступенях поверхности нанопроволок меди шириной 20 – 80 нм и высотой 1 – 3 нм (рис. 4 а). Образование полностью сформированных сплошных полосок меди происходит при покрытии 10 - 15 МС. При увеличении покрытия меди происходит срастание полосок между собой, что приводит к формированию сплошной пленки на поверхности.

После каждого напыления проводились измерения электрической проводимости образца в зависимости от угла поворота относительно кристаллографических направлений подложки (рис. 4 б).

Исходя из анализа картин ДМЭ и пространственной конфигурации образца относительно зондов, можно видеть, что максимум проводимости наблюдается в направлении  $[1\bar{1}0]$ . Это направление, в котором

ориентированы ступени, а, соответственно, и медные полоски. В направлении  $[\bar{1}12]$  наблюдаются минимумы значения проводимости. Видно, что угол между максимумом и минимумом проводимости составляет  $90^\circ$ .

Анизотропия электрической проводимости достигает  $R_{\perp}/R_{\parallel} \sim 5,0$  при покрытии меди 15 МС. Из данных, представленных на рис. 4 (б), а также принимая во внимание, что  $R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_x\sigma_y}} \ln(1 + \frac{\sigma_y}{\sigma_x})$ , где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – поверхностные проводимости во взаимно перпендикулярных направлениях, получим вдоль нанопроволок меди  $\sigma_x = \sigma_{\parallel} = 19,2$  мСм/□ и в перпендикулярном направлении  $\sigma_y = \sigma_{\perp} = 6,3$  мСм/□. Таким образом, удельное сопротивление нанопроволоки можно оценить величиной  $\rho = d / \sigma_{\parallel} \cong 8$  мкОм·см, где  $d \approx 1,5$  нм – толщина слоя меди, образованного нанопроволоками. Значение сопротивления оказалось примерно в 5 раз выше, чем для объемного куска меди (1,7 мкОм·см). Возможно, это связано с тем, что электроны проводимости рассеиваются на границах нанопроволок, которые имеют довольно неровную поверхность (рис. 4 а). Полученная величина, по крайней мере, вдвое меньше значения сопротивления (17 мкОм·см), полученного в работе [5] для нанопроволок диаметром 60 нм.

Пятая глава представляет результаты исследования стабильности поверхностных фаз по отношению к формированию сверху аморфной пленки кремния, во втором разделе этой главы рассматривается, как такой процесс может повлиять на величину электрической проводимости.

В первом разделе описаны эксперименты по захоронению поверхностных фаз. Исследование стабильности поверхностных фаз при помощи методов ДМЭ и ДОБЭ было основано на следующем предположении. В случае стабильной поверхностной сверхструктуры уменьшение интенсивности и основных и сверхрефлексов в дифракционной картине во время напыления сверху слоя аморфного кремния должно происходить одновременно и приблизительно с



одной скоростью. В случае разрушения сверхструктуры сверхрефлексы должны затухать быстрее по сравнению с основными рефлексами.

На основании полученных данных можно предположить, что стабильность структуры поверхностной фазы зависит от ее состава. Если поверхностная фаза включает в себя атомы адсорбата и подложки, она является стабильной во время роста сверху слоя  $\alpha$ -Si при комнатной температуре, тогда как поверхностные фазы, состоящие только из атомов адсорбата, разрушаются на ранних стадиях напыления Si. Такой эффект наблюдался на поверхности кремния и с ориентацией (100) и с ориентацией (111) (Рис. 5). Предполагается, что атомы кремниевой подложки, встроенные в поверхностную фазу, играют роль «стабилизирующего фактора». Массоперенос кремния пренебрежимо мал при относительно низких температурах, близких к комнатной [1], следовательно, поверхностные фазы со встроенными атомами подложки кремния более стабильны по сравнению с фазами, в составе которых нет атомов кремния.

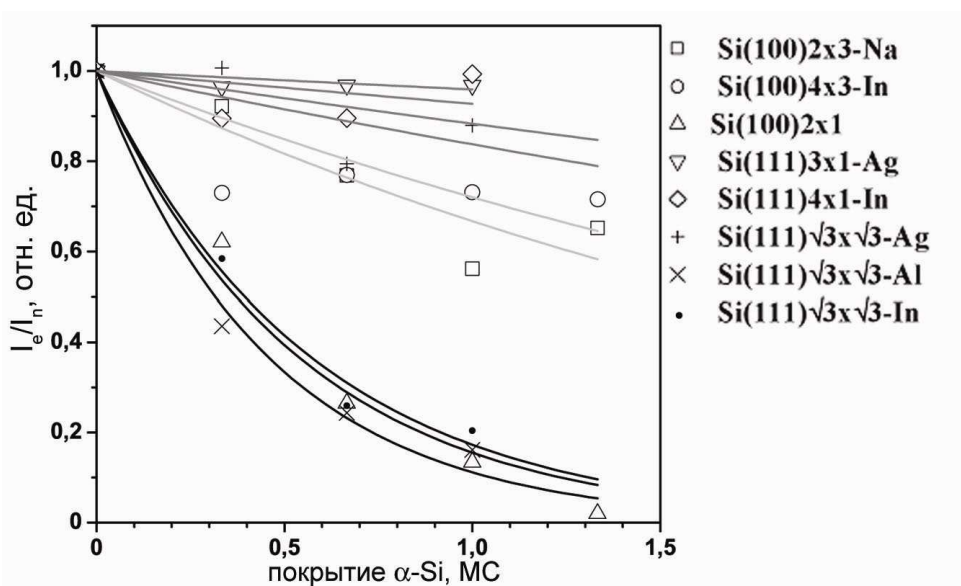


Рис. 5 Нормализованное отношение интенсивности сверхрефлексов ( $I_e$ ) и основных рефлексов ( $I_n$ ) в дифракционной картине в зависимости от покрытия кремния, напыленного при комнатной температуре. Точки аппроксимированы функцией вида  $\frac{I_e}{I_n} = e^{-A\theta}$ .

Во втором разделе описаны эксперименты по исследованию изменения величины проводимости образца как для поверхностных фаз, которые сохраняют свою структуру, так и для поверхностных фаз, которые разрушаются в процессе напыления сверху атомов кремния.

С точки зрения электрических свойств, поверхностная фаза является дополнительным каналом проводимости и ток, протекающий через образец, покрытый поверхностной фазой, разделяется вследствие формирования двух каналов проводимости - через объемный образец и через поверхностную фазу [6]. В случае разрушения поверхностной фазы во время напыления  $\alpha$ -Si (доказательством служит затухание сверхрефлексов в дифракционной картине) поверхностные состояния, принадлежащие атомам в поверхностной фазе, исчезают, и образуется поверхность с плоскими зонами. Следовательно, в этом случае канал проводимости через поверхностную фазу разрушается, и электрическая проводимость должна уменьшаться. В случае сохранения структуры поверхностной фазы проводимость должна оставаться постоянной. Действительно, как показано на рис. 6, во время напыления  $\alpha$ -Si при комнатной температуре на поверхностные фазы  $\text{Si}(100)4\times 3\text{-In}$  и  $\text{Si}(100)2\times 3\text{-Na}$  проводимость остается постоянной при напылении до 3 МС  $\alpha$ -Si.

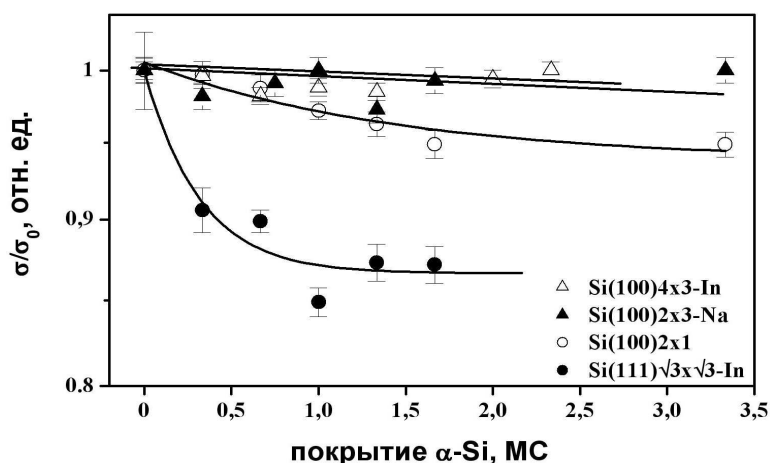


Рис. 6 Относительное изменение электрической проводимости поверхностных фаз ( $\sigma/\sigma_0$ ) в зависимости от покрытия кремния, напыленного при комнатной температуре.

В то же время видно, что проводимость поверхностных фаз  $\text{Si}(100)2 \times 1$  и  $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-In}$ , состоящих только из адатомов, падает, соответственно, на 5 % и 15 % во время напыления 2 МС кремния. В этом случае поверхностная фаза разрушается и образованный ею канал проводимости исчезает, приводя к падению проводимости.

Таким образом, поверхностные фазы, состоящие как из атомов адсорбата, так и из атомов подложки, встроенных в фазу, являются структурно и электрически стабильными по отношению к росту субмонослойных пленок аморфного кремния. Поверхностные фазы, состоящие только из атомов адсорбата, расположенных на объемно-подобной поверхности подложки, разрушаются на ранних стадиях напыления кремния, и этот процесс сопровождается уменьшением проводимости образца.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

На сверхвысоковакуумной установке Riber DEL-300, оснащенной устройствами для исследования поверхности методом дифракции медленных электронов и четырехзондовым методом измерения электрической проводимости было проведено исследование электрической проводимости подложек кремния с различными поверхностными фазами, нанопроволоками меди и островками, а также исследовано влияние величины стабильности поверхностных фаз на электрическую проводимость.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать следующие общие выводы:

1) Охлаждение подложки с поверхностными фазами  $\text{Si}(111)7 \times 7$ ,  $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Ag}$  и системы с монослоем серебра на поверхности  $\text{Si}(111)$  приводит к увеличению значения проводимости при понижении температуры образца.

2) Наблюдается анизотропия электрической проводимости поверхностных фаз  $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-In}$  и  $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-In}$ . Установлено, что направления, в которых проводимость максимальна, совпадают с направлениями максимальной

атомной плотности в поверхностной фазе  $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-In}$ . В поверхностной фазе  $\text{Si}(111)4\times 1\text{-In}$  направления, в которых наблюдаются максимумы проводимости, совпадают с направлениями одномерных цепочек индия.

3) Наблюдается анизотропия электрической проводимости образца с системой нанопроволок меди, сформированной на ступенях поверхности с поверхностной фазой  $\text{Si}(111)5,55\times 5,55\text{-Cu}$ . Установлено, что направления, в которых проводимость максимальна, совпадают с направлениями, в которых ориентированы полоски меди. Удельное сопротивление составляет 8 мкОм·см, что примерно в пять раз выше аналогичного значения объемной меди.

4) Формирование островков алюминия или индия на поверхностной фазе  $\text{Si}(100)c(4\times 12) - \text{Al}$  приводит к уменьшению электрической проводимости образца. Величина, на которую снизилось значение проводимости, коррелирует с количеством сформированных островков.

5) Наблюдается различная величина стабильности поверхностных фаз по отношению к формированию сверху слоя аморфного кремния. Поверхностные фазы, состоящие только из атомов адсорбата, разрушаются при напылении сверху слоя кремния. Поверхностные фазы, в состав которых входят не только атомы адсорбата, но и атомы подложки кремния, практически не разрушаются при напылении сверху кремния.

6) Разрушение поверхностных фаз сопровождается уменьшением величины проводимости для поверхностных фаз, которые не сохраняют свою структуру при напылении кремния, тогда как стабильные поверхностные фазы характеризуются постоянной величиной проводимости в течение всего процесса формирования слоя аморфного кремния.

Личный вклад автора. Экспериментальные результаты по исследованию электрической проводимости поверхностной фазы чистого кремния  $\text{Si}(111)7\times 7$  и поверхностных фаз кремний-адсорбат при охлаждении были получены лично автором работы. Кроме того, автором были проведены эксперименты по исследованию электрических характеристик системы островков индия и

алюминия, сформированных на поверхностной фазе Si(100)c(4x12) – Al, а также исследования по изучению влияния анизотропии структуры и величины стабильности на электрическую проводимость. Также модифицировано либо разработано и изготовлено необходимое оборудование для исследований. Автор лично участвовала в анализе всех полученных в работе результатов, а также их математической обработке.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1. 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. – P.245608.

2. 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. – С. 11,. Lavrinaytis M.V., Tsukanov D.A., Ryzhkov S.V. Anisotropic Electric Conductivity of In–Si(111) Surface Phases // Technical Physics Letters – 2007. - V. 33. - P.11.

3. Лавринайтис М.В., Цуканов Д.А., Грузнев Д.В. Исследование кристаллической структуры и электронных свойств поверхностных фаз металлов на кремнии // Вестник ДВО РАН, Приложение. – 2006. –№4.

4. Лавринайтис М.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. – С. 67. Lavrinaytis M.V., Tsukanov D.A., Ryzhkov S.V. Studying the Electric Conductivity of the Si(100) c(4x12)–Al Surface Phase during Deposition of Indium and Aluminum // Technical Physics Letters – 2005. - V. 31. - P.1068.

5. Лавринайтис М.В., Цуканов Д.А., Рыжков С.В. Исследование влияния структуры, состава и морфологии поверхностных фаз на электрическую проводимость поверхности кремния // Вестник ДВО РАН, Приложение. – 2005. –№6.

6. Lavrinaytis M.V., Tsukanov D.A., Ryzhkov S.V. 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.

7. Lavrinaytis M.V., Tsukanov D.A., Ryzhkov S.V. and Lifshits V.G. Stability of Si-metal surface reconstructions during a - Si deposition // Proceedings of the Fifth Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces, Russia, Vladivostok. - 2002.

8. Лавринайтис М.В., Цуканов Д.А., Рыжков С.В., Лифшиц В.Г. Исследование стабильности и электрической проводимости Si-Me поверхностных фаз // Сборник тезисов IV Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Россия, Санкт-Петербург. - 2002.

9. Lavrinaytis M.V., Tsukanov D.A., Ryzhkov S.V. and Lifshits V.G. Stability and transport properties of Si-Me surface reconstructions during a-Si deposition // Proceedings of the 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, Nara, Japan. - 2003.

10. Лавринайтис М.В., Цуканов Д.А., Рыжков С.В., Лифшиц В.Г. Исследование электрической проводимости поверхностных фаз в системе Ag/Si(111) при низкой температуре // Тезисы четвертой региональной научной конференции «Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование», Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, Россия. - 2003.

11. Рыжкова М.В., Цуканов Д.А., Рыжков С.В. Исследование проводимости поверхностной фазы Si(100)c(4x12)-Al при напылении In и Al // Труды девятой региональной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, Россия - 2005.

12. Рыжкова М.В., Цуканов Д.А., Рыжков С.В., Грузнев Д.В. Электрическая проводимость поверхностной фазы Si(100)c(4x12)-Al при напылении In и Al // Тезисы региональной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике, Владивосток, ИФИТ ДВГУ, Россия. - 2006.

13. Рыжкова М.В., Цуканов Д.А., Рыжков С.В. Анизотропия электрической проводимости поверхностных фаз Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -In и Si(111)4x1-In при 150 K // Труды десятой региональной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, Россия. - 2006.

14. Рыжкова М.В., Цуканов Д.А., Ларькович Д.Г. Анизотропия электрической проводимости в системе Cu/Si(111) // Труды XI конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, Россия. - 2007.

15. Ryzhkova M.V., Tsukanov D.A., Ryzhkov S.V. Study of electrical conductivity of surface phases on silicon in situ // Proceedings of the 15th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", Novosibirsk, Russia. - 2007.

16. Tsukanov D.A., Ryzhkova M.V., D.G. Larkovich, D.V. Gruznev, O.A. Utas, V.G. Kotlyar, A.V. Zotov, A.A. Saranin Electrical conductance of Cu nanowires on Si(111)'5x5'-Cu surface // Proceedings of the 16th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", Vladivostok, Russia. - 2008.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Lifshits V.G., Saranin A.A., Zotov A.V. Surface Phases on Silicon: Preparation, structures and properties. – Chichester, John Wiley & Sons, 1994. – 450 p.
2. Постановление правительства Российской Федерации от 9 июня 2007 г. N 364 "О Правительственном совете по нанотехнологиям".
3. Bauerle F., Monch W., Henzler M. Correlation of Electronic Surface Properties and Surface Structure on cleaned Silicon Surfaces // J. Appl. Phys. - 1972. - V. 43. - P.3917 - 3919.
4. Hasegawa S., Tong X., Takeda S., Sato N., Nagao T. Structures and electronic transport on silicon surfaces // Progress in Surface Science. 1999. – V. 60 – P. 89 – 257.
5. Morales M.E.T., Höhberger E.M., Schaefflein Ch, Blick R.H., Neumann R., Trautmann C. Electrical characterization of electrochemically grown single copper nanowires // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 82. – P. 2139.
6. 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. - V. 162-163 – P. 168 – 171.

Рыжкова Мария Валерьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ  
НАНОСТРУКТУР, ОБРАЗОВАННЫХ АДСОРБАТАМИ I, III ГРУПП НА  
ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ**

автореферат

Подписано в печать 11.11.08 г., Усл. п.л. 1.2. Уч. - изд. л.1.  
Формат 60×84/16, Тираж 100. Заказ 43.

---

Издано ИАПУ ДВО РАН. Владивосток, Радио, 5  
Отпечатано в ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, Радио, 5