

На правах рукописи

Одобеско Артём Борисович

**Электрофизические свойства поверхностной
реконструкции Si(111) – 7×7
слабелегированного кремния**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Зайцев-Зотов Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: член-корреспондент РАН, профессор,
доктор физико-математических наук,
зам. директора по научной работе
ИАПУ ДВО РАН

Саранин Александр Александрович
доктор физико-математических наук,
заведующий отделом Технологий и
измерений атомного масштаба

ИОФ им. А.М. Прохорова РАН
Ельцов Константин Николаевич

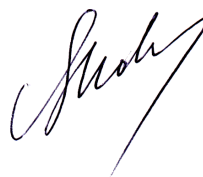
Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
университет

Защита состоится 26 декабря 2012 года, в 16³⁰ на заседании диссертационного
совета Д 212.130.06 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское
шоссе, д. 31. тел. 8(499)323-95-26, 8(499)324-84-98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан ___ ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



В.П. Яковлев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Физика систем с пониженной размерностью представляет собой одну из динамично развивающихся областей современной науки. Поиск новых возможностей и физических явлений, которые могли бы лечь в основу современных приборов и устройств поддерживают большой интерес к данной области. Весьма перспективными 2D электронными системами являются поверхностные реконструкции на атомарно чистых гранях полупроводников, как с точки зрения создания на их основе различных нано-объектов (квантовые нити, квантовые точки), так и в плане изучения новых свойств электронного транспорта в данных объектах. Одним из ярких примеров поверхностных структур является реконструкция $\text{Si}(111) - 7 \times 7$, образующаяся при прогреве образца кремния за счет процессов самоорганизации и стабильной в широком диапазоне температур. В частности, ряд свойств таких 2D систем обусловлен электронными корреляциями, что может приводить к таким экзотическим эффектам как образование электронного вигнеровского кристалла, формирование на поверхности сверхструктур типа волны зарядовой или спиновой плотности, переход Мотта-Хаббарда металл-диэлектрик.

Настоящая работа посвящена исследованию свойств электронного транспорта в наиболее широко известной поверхностной реконструкции $\text{Si}(111) - 7 \times 7$ в слабелегированных образцах кремния. Кремний по-прежнему является основным материалом современной электроники, и знание его свойств и, в частности, свойств поверхности необходимо для практического использования этого материала. В то же время в литературе существуют противоречивые данные о физических свойствах поверхности $\text{Si}(111) - 7 \times 7$, что делает актуальным ее изучение. Существует также проблема связанная с ограниченностью ряда современных экспериментальных методик при работе на слабелегированных образцах кремния при низких температурах. Предложенные в

диссертации оригинальные методики решения этой актуальной задачи позволили получить новые результаты в данном направлении исследований.

Цель диссертационной работы. Целью работы является экспериментальное исследование электронного транспорта и туннельной плотности состояний поверхностной реконструкции $\text{Si}(111) - 7 \times 7$ на слаболегированных образцах кремния при низких температурах.

Научная новизна и практическая значимость.

В диссертации предложена и продемонстрирована оригинальная методика низкотемпературных измерений топографии поверхности и туннельной плотности состояний на слаболегированных образцах кремния методом СТМ и СТС, используя подсветку образца внешним источником света. Свет обеспечивает достаточную проводимость объема образца кремния, необходимую для работы методом СТМ при низких температурах. Так же, за счет эффекта поверхностной фото-ЭДС устраняется изгиб объемных зон вблизи поверхности, что позволяет проводить исследования исходных свойств поверхностных состояний в гораздо меньшей степени искаженных случайным потенциалом примесей и полем объемного заряда.

С помощью данной методики проведены измерения туннельных ВАХ на образцах $\text{Si}(111) - 7 \times 7$ n - и p -типа с удельным сопротивлением $\rho = 1 \text{ }\Omega\text{см}$. Обнаружено, что для реконструкции $\text{Si}(111) - 7 \times 7$ при $T = 5 \text{ К}$ в плотности поверхностных состояний на уровне Ферми образуется энергетическая щель $2\Delta = 40 \pm 10 \text{ мэВ}$ одинаковая для образцов n - и p -типа. Впервые проведены измерения туннельной плотности поверхностных состояний в зависимости от температуры в диапазоне от 5К до 78К. Обнаружено, что энергетическая щель в плотности состояний реконструкции $\text{Si}(111) - 7 \times 7$ постепенно раз-

мывается с ростом температуры и исчезает при $T > 40$ К. Проведена оценка флуктуационного размытия энергетической щели, разделены вклады метода измерений и тепловых флуктуаций, присущих самой щели.

В диссертации описано разработанное СВВ устройство измерения поверхностной проводимости четырехзондовым методом на основе криогенератора замкнута цикла. Реализована малошумящая схема измерений, которая позволяет проводить измерения ВАХ при низких температурах, когда сопротивление образцов достигает $10 \text{ Г}\Omega$. Впервые проведены измерения поверхностной проводимости реконструкции Si(111) – 7×7 четырехзондовым методом в ранее неизученном диапазоне температур от 35 К до 90 К. Обнаружено, что в данном диапазоне зависимость поверхностной проводимости от температуры имеет активационный характер с энергией активации $\epsilon_a = 25 \pm 2.5$ мэВ для образцов кремния с $\rho = 1 \text{ }\Omega\text{см}$.

Полученные экспериментальные результаты важны как для понимания фундаментальных транспортных свойств в 2D электронных системах, таких как Si(111) – 7×7 , так и в области практических применений, связанных с возможностью создания новых приборов, использующих свойства поверхностных реконструкций и различных нанообъектов, расположенных на поверхности полупроводников. Предложенная методика измерений с помощью дополнительной подсветки существенно расширяет диапазон параметров объектов, пригодных для экспериментальных исследований методами СТМ и СТС.

Достоверность. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается комплексным использованием хорошо известных, широко применяемых и доказавших свою надежность и достоверность экспериментальных приборов и методик физики поверхности; признанием полученных ре-

зультатов научной общественностью при обсуждениях на научных семинарах, конференциях, а также положительными рецензиями статей при публикациях результатов в научных журналах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработано СВВ устройство на основе криогенатора замкнутого цикла для измерения поверхностной проводимости четырехзондовым методом и ее зависимости от температуры. Проведены измерения четырехзондовым методом поверхностной проводимости реконструкции Si(111)– 7×7 в ранее неизученном диапазоне температур от 35К до 90К. Обнаружено, что в данном диапазоне зависимость поверхностной проводимости от температуры имеет активационный характер с энергией активации $\epsilon_a = 25 \pm 2.5$ мэВ для образцов кремния с $\rho = 1$ Омсм.
2. Предложена и продемонстрирована методика измерений топографии поверхности методом СТМ и туннельной плотности состояний методом СТС на слаболегированных образцах кремния при температуре жидкого гелия с использованием внешней подсветки.
3. Проведены измерения туннельной плотности поверхностных состояний для образцов кремния n - и p -типа с $\rho = 1$ Омсм. Обнаружена особенность на уровне Ферми в плотности поверхностных состояний реконструкции Si(111) – 7×7 в виде энергетической щели величиной $2\Delta = 40 \pm 10$ мэВ при температуре $T = 5$ К, одинаковой для слаболегированных образцов кремния n - и p -типа.
4. Проведены измерения туннельных спектров плотности поверхностных состояний реконструкции Si(111) – 7×7 в зависимости от температуры образца в диапазоне от 5 К до 78 К. Обнаружено, что щель постепенно

размывается с ростом температуры и исчезает при $T > 40\text{К}$. Проведена оценка флуктуационного размытия энергетической щели, разделены вклады метода измерений и тепловых флуктуаций, присущих самой щели.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. Международный симпозиум „Физика низкоразмерных систем“, г. Ростов-на-Дону, 5 - 9 сентября 2008 г.
2. XV Международный симпозиум „Нанофизика и наноэлектроника“, г. Нижний Новгород, 14 - 18 марта 2011 г.
3. 19th international symposium Nanostructures: Physics and Technology, г. Екатеринбург, 20 -25 июня 2011 г.
4. X Российская конференция по физике полупроводников, Нижний Новгород, 19-23 сентября 2011 г.
5. 2nd International school of surface science „Technologies and Measurements on Atomic Scale“ SSS TMAS, г. Хоста(Сочи), 01-07 октября 2012 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, из них 3 статьи опубликованы в журналах, включенных в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, в том числе 2 статьи в российских [1, 2] и 1 статья [3] в зарубежном журнале, и 3 статьи в сборниках трудов российских [4] и международных конференций [5, 6].

Личный вклад автора. В диссертации изложены экспериментальные результаты полученные автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор лично принимал участие в разработке СВВ устройства для измерения поверхностной проводимости четырехзондовым методом, занимался сборкой, отладкой, автоматизацией измерений данного устройства. Совместно с соавторами автор лично осуществлял постановку задачи исследований, определял методы их решения, разрабатывал методики измерений, разрабатывал и изготавливал СВВ оборудование и схемы измерений, необходимые для проведения исследований, проводил исследования, обрабатывал и анализировал экспериментальные данные, проводил численные расчеты, осуществлял написание научных статей, докладов и их подготовку к публикации. Все доклады на конференциях по материалам диссертации были сделаны лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитированной литературы. Работа изложена на 115 страницах, содержит 53 рисунка, 1 таблицу и список литературы из 52 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, описан личный вклад автора, приведен список печатных работ, в которых отражено основное содержание диссертации.

Первая глава состоит из трех разделов и посвящена вопросу изучения электронного транспорта в поверхностных структурах. В первом разделе дается краткое введение в основы методики измерения поверхностной проводимости, показана актуальность и современное состояние данной области науки, дается краткий обзор и сравнительный анализ исследовательских установок позволяющих проводить измерения такого рода, а так же представлены ключевые результаты полученные с помощью данного метода. Также представлены сведения об основных данных по электронным свойствам реконструкции Si(111) — 7×7 , в том числе полученных из измерений поверхностной проводимости данной структуры. Указывается на несоответствие некоторых результатов полученных с помощью измерения поверхностной проводимости, в одних работах поверхность металлическая, с точки зрения проводимости ($d\sigma/dT < 0$) [1], в других она диэлектрическая [2]. Более того, разброс результатов измерений полученных разными экспериментальными группами для величины проводимости составляет три порядка [1–4].

На основании приведенного анализа литературных данных, формулируются задача о необходимости проведения дополнительных исследований по поверхностной проводимости реконструкции Si(111) — 7×7 . Для решения этой задачи необходимо разработать устройство для измерения проводимости, сопряженное со СВВ камерой и возможностью проводить измерения в широком диапазоне температур.

Во втором разделе ведется подробное описание разработанной в рамках данной диссертационной работы СВВ устройство для измерения поверхностной проводимости четырехзондовым методом на основе криогенератора замкнутого цикла. Подробно описаны все основные узлы и технологии использованные в создании данной исследовательской установки: система позиционирования и подвода зондов к поверхности образца, система охлаждения и измерения температуры, электрометрическая схема измерений и сбора данных,

СВВ часть и сопряжение устройства с основной камерой, оснащенной СТМ, системой подготовки и создания различных поверхностных структур. Приведены основные характеристики и преимущества разработанного устройства.

В третьем разделе данной главы идет речь о подготовительных этапах к электрометрическим измерениям таких как: подготовка образца кремния с реконструкцией Si(111) – 7×7 , подготовка четырехконтактных микрозондов, используемых для измерений. Методически рассмотрены все этапы подготовительной работы.

Вторая глава непосредственно посвящена измерению проводимости поверхности реконструкции Si(111) – 7×7 . Подробно описана методика проведения измерений, процесс сбора и обработки данных. Демонстрируются результаты измерений ВАХ при температуре $T = 35$ К на образце кремния с сопротивлением порядка 10^{10} Ω , рабочие токи составляют десятки пикоампер.

Во втором разделе проводится оценка влияния вклада объемной проводимости в результаты измерений. Показано, что эффективным методом уменьшения вклада объема, помимо уменьшения расстояния между зондами [5], является использование слаболегированных образцов и проведение измерений при низких температурах. В этом случае проводимость объема при низких температурах вымерзает и измеряется проводимость поверхности. Показано, что вклад объемной проводимости при данных параметрах эксперимента и температуре ниже 200 К как минимум на два порядка ниже проводимости поверхности.

В третьем разделе представлены основные результаты измерения на образцах кремния n - и p -типа с удельным сопротивлением $\rho = 0.3$ $\Omega\text{см}$ и $\rho = 1$ $\Omega\text{см}$. Из полученных результатов измерений следует, что проводимость поверхности Si(111) – 7×7 не соответствует металлическому типу, зависимость

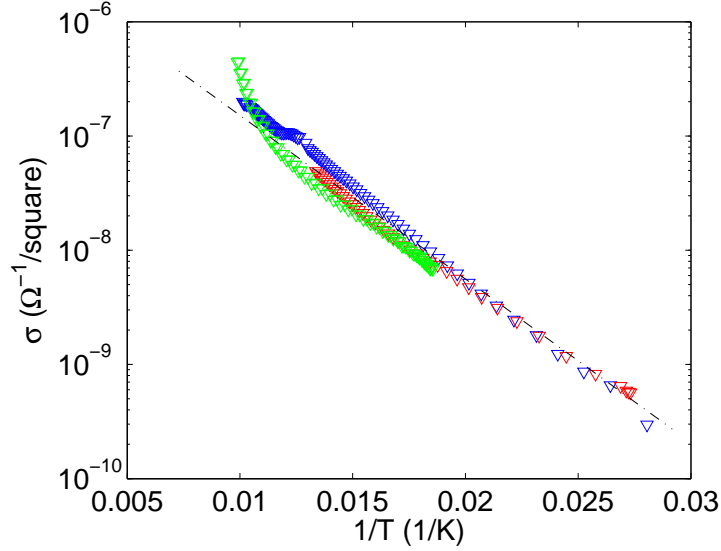


Рис. 1. Данные зависимости поверхностной проводимости Si(111) – 7×7 от температуры для образцов n -типа с $\rho = 1 \text{ }\Omega\text{см}$. Разным цветом отмечены результаты измерения выполненные разными микронзондами на разных образцах. Зависимость проводимости имеет активационный характер с энергией активации $\epsilon_a = 25.8 \text{ мэВ}$ ($T = 300 \text{ К}$).

проводимости имеет активационный характер $\sigma \propto \sigma_0 \exp(-\frac{\epsilon_a}{kT})$ в диапазоне температур от 35 К до 100 К, с энергией активации $\epsilon_a = 25 \pm 2.5 \text{ мэВ}$.

В заключении представлен анализ результатов измерений полученных в работе и их сравнение с данными опубликованными в литературе. Показано, что удалось значительно расширить диапазон измерений поверхностной проводимости в область низких температур, причем для образцов n -типа результаты хорошо согласуются с данными полученными в области температур $T > 100 \text{ К}$ в работе [2]. В случае образцов p -типа, есть расхождения в результатах с данными полученными в работе [1].

Третья глава посвящена исследованию электрофизических свойств реконструкции Si(111) – 7×7 методом сканирующей туннельной спектроскопии и микроскопии при низких температурах. В первой части данной главы дается краткое введение в основы сканирующей туннельной спектроскопии, описана

экспериментальная установка и дается подробное описание методики измерений и обработки результатов, подготовки зондов СТМ и способы проверки достоверности результатов.

В разделе 3.1 приводится обзор полученных ранее результатов с помощью СТС для реконструкции Si(111) – 7×7 при комнатной и при низких температурах. Так, при $T = 5$ К в плотности поверхностных состояний реконструкции Si(111) – 7×7 на уровне Ферми наблюдается энергетическая щель [6, 7], которая отсутствует при комнатной температуре [8], причем величина энергетической щели в разных работах варьируется от 1 эВ [6] до 70 мэВ [7]. Одной из причин разброса результатов для величины энергетической щели, указывается возможное влияние легирования объема на свойства изучаемой поверхности. Приводится численная оценка, из которой следует, что для типично используемых образцов кремния в низкотемпературных исследованиях свойств Si(111) – 7×7 методами СТМ и СТС с $\rho \sim 0,001$ Омсм, изменение поверхностной плотности свободных носителей заряда, вследствие изгиба зон объема вблизи поверхности, составляет около 40% от начальной величины. Для слаболегированных образцов кремния с $\rho = 1$ Омсм этот эффект составляет менее 1%.

На основании сделанных утверждений, ставится задача о проведении исследования электрофизических свойств реконструкции Si(111) – 7×7 при низких температурах на слаболегированных образцах кремния, с целью исключить влияние легирования объема на свойства данной поверхности.

Для решения поставленной задачи, в разделе 3.4 предлагается использовать внешнее освещение образца кремния источником света, с энергией фотона больше величины объемной запрещенной зоны. Свет обеспечивает фотопроводимость в объеме и позволяет проводить измерения при низких температурах на слаболегированных образцах кремния, не проводящих в данном диапазоне температур. Демонстрируется практическое применение данного

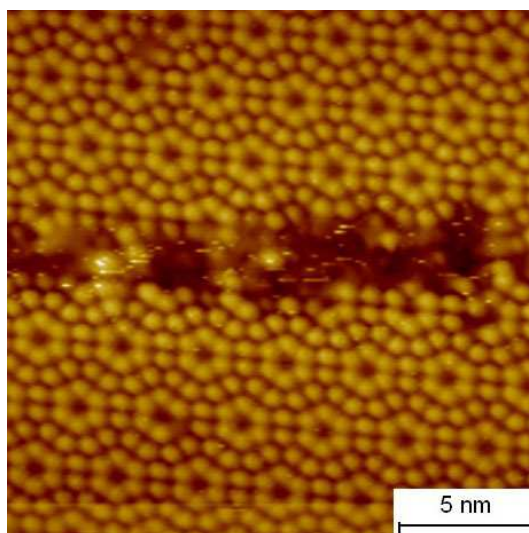


Рис. 2. СТМ изображение участка поверхности с реконструкцией $\text{Si}(111)-7\times 7$, полученной на образце p -типа с $\rho = 1 \text{ }\Omega\text{см}$ при $T = 5 \text{ К}$. Свет включен в нижней и верхней части изображения, в центральной части свет выключен. Параметры сканирования $I_t = 100 \text{ пА}$, $U_t = 2 \text{ В}$.

метода, представлены СТМ изображения топографии поверхности полученные при $T = 5$ на образцах с $\rho = 1 \text{ }\Omega\text{см}$ при внешнем освещении и отсутствие изображения при выключенном освещении (рис. 3).

Детально описана методика проведения измерений с использованием внешнего освещения образца. Показано, что при внешней подсветке образца возникает эффект поверхностной фото-ЭДС, который приводит к разгибанию объемных зон вблизи поверхности и восстанавливает начальную концентрацию свободных носителей зарядов на поверхности. Этот эффект приводит к сдвигу нуля в данных измерений туннельных ВАХ. Приведены оценки для максимального значения сдвига за счет эффекта поверхностной фото-ЭДС при полном распрямлении объемных зон, они составляют 0.6 В для образцов p -типа легированных бором, и -0.4 В для образцов n -типа легированных фосфором. Показано что результаты измерений полностью совпадают с теоретическими оценками.

В разделе 3.5 приводится еще один способ позволяющий проводить из-

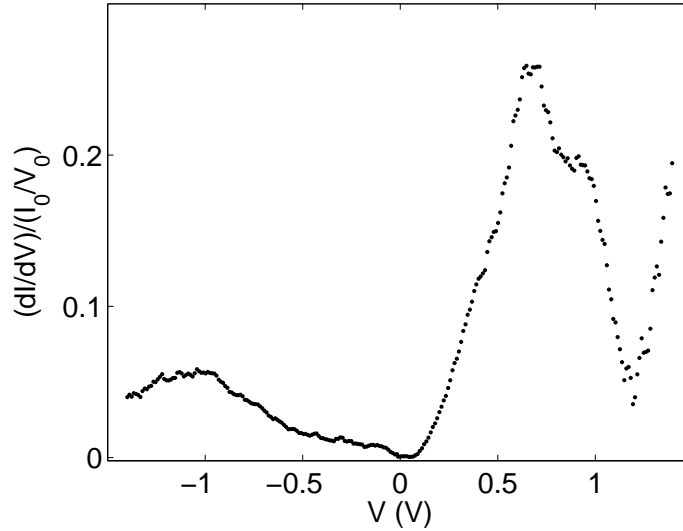


Рис. 3. Данные dI/dV чистой реконструкции Si(111) – 7×7 в области тени, окруженной напыленным контактом в виде пленки In, полученные при включенном освещении образца. Образец кремния p -типа с $\rho = 1 \text{ }\Omega\text{см}$, температура $T = 5 \text{ К}$. Наблюдается энергетическая щель в плотности поверхностных состояний при $V = 0 \text{ В}$. Сдвиг данных за счет эффекта поверхностной фото-ЭДС практически отсутствует.

мерения на слаболегированных образцах при низких температурах. Суть его заключается в создании металлического контакта непосредственно к объекту исследований (поверхности Si(111) – 7×7), путем напыления проводящей пленки *in situ*. При этом зонд СТМ подведен к поверхности на расстояние порядка 10 нм и используется в качестве маски. В тени от зонда остается чистая поверхность, окруженная металлической пленкой, которая на границе формирует контакт к поверхности. Показано, что данный метод позволяет проводить измерения без использования внешнего освещения образца, а при включенном внешнем освещении, эффекта поверхностной фото-ЭДС не наблюдается.

В конце главы приводятся основные результаты измерений. Обнаружено, что при $T = 5 \text{ К}$ в данных туннельной плотности поверхностных состояний на уровне Ферми наблюдается энергетическая щель, величина щели для

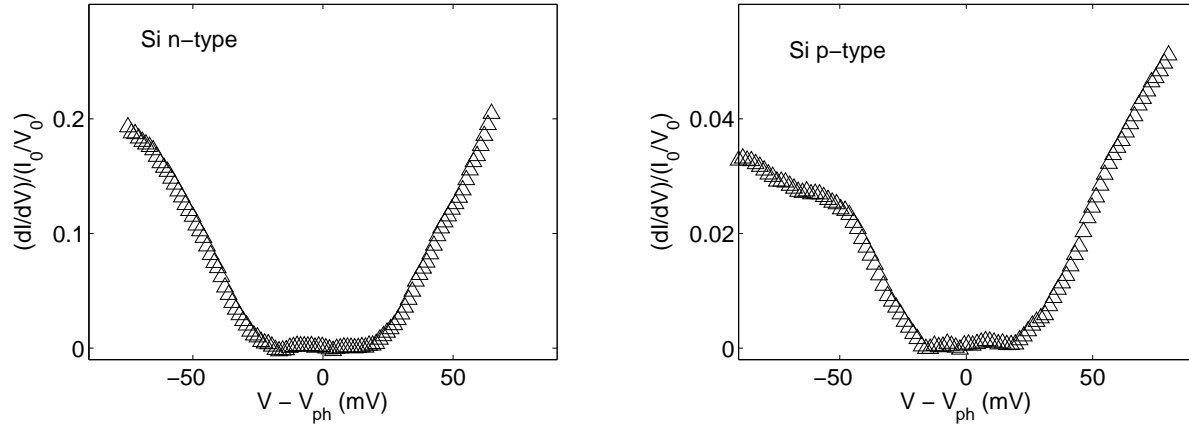


Рис. 4. Нормализованные данные dI/dV полученные путем численного дифференцирования туннельных ВАХ, измеренных на образцах Si(111) – 7×7 n - и p -типа с $\rho = 1 \Omega\text{см}$ при $T = 5\text{К}$ и при внешнем освещении образца. Для наглядности из результатов измерений вычтен сдвиг напряжения V_{ph} от вклада эффекта поверхностной фото-ЭДС. Величина энергетической щели в плотности поверхностных состояний для образцов n - и p -типов составляет $2\Delta = 40 \pm 10$ мэВ.

образцов кремния n - и p -типов одинакова и составляет $2\Delta = 40 \pm 10$ мэВ (рис. 4). Также приводятся результаты измерений при разных расстояниях между зондом СТМ и поверхностью. Показано, что в случае освещения образца кремния внешним источником света, сопротивление объема значительно меньше сопротивления туннельного промежутка, и это не приводит к увеличению величины энергетической щели при уменьшении расстояния между зондом и поверхностью [7]. Представлены результаты измерений туннельной плотности состояний при температуре жидкого азота. Из полученных данных видно, что энергетическая щель в плотности поверхностных состояний на уровне Ферми при $T = 78 \text{ К}$ исчезает.

Четвертая глава представляет результаты исследования температурной зависимости туннельной плотности состояний реконструкции Si(111) – 7×7 . В первом разделе представлены результаты измерений туннельной плотности

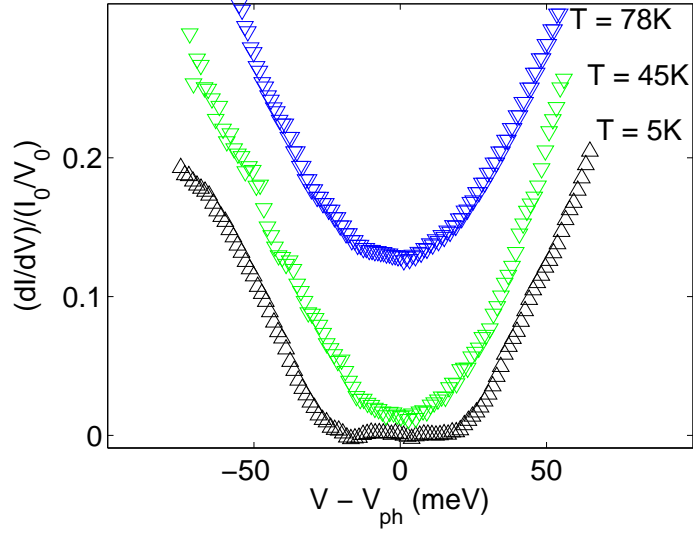


Рис. 5. Набор данных dI/dV измеренных методом СТС для реконструкции $\text{Si}(111) - 7 \times 7$ на образцах n -типа при различных температурах образца.

поверхностных состояний измеренных в диапазоне температур от 5 К до 45 К методом СТС. Показано, что энергетическая щель в плотности состояний с повышением температуры постепенно замыкается и исчезает при $T \approx 40$ К, выше которой в данных dI/dV на уровне Ферми имеется ненулевая плотность состояний (рис. 5). Явных свидетельств наличия фазового перехода металл-диэлектрик при температуре $T \approx 20$ К, о котором имеются указания в работе [7], из данных измерений туннельных ВАХ не наблюдается.

Во втором разделе данной главы приводится оценка вклада тепловых флуктуаций, влияющих на приборное разрешение метода СТС и, как следствие, на результаты измерений, что в свою очередь может приводить к наблюдаемому размытию щели. Получено теоретическое выражение описывающее тепловое размытие данных туннельных ВАХ

$$\frac{e}{k} \frac{1}{\left[\ln\left(\frac{dI}{dV}\right)\right]'} \approx T, \quad (1)$$

где $'$ означает производную по напряжению. Описана процедура вычисления величины $\frac{e}{k} \frac{1}{\left[\ln\left(\frac{dI}{dV}\right)\right]'}$ из экспериментальных данных, и показано (рис. 6) что

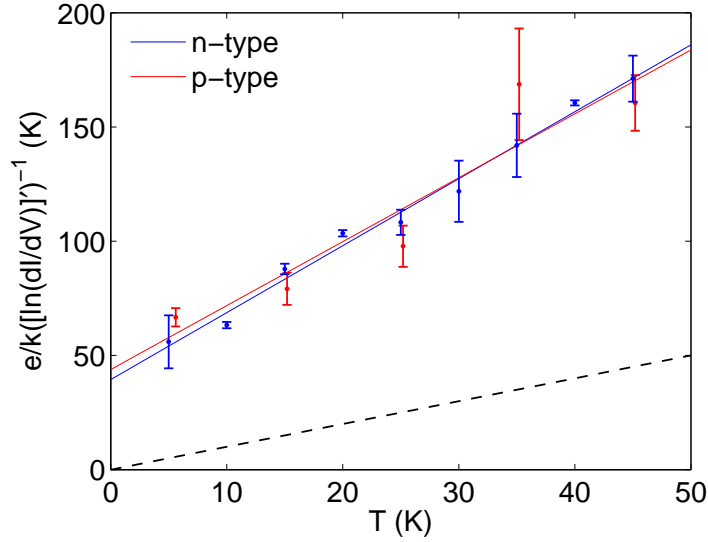


Рис. 6. График зависимости величины $\frac{e}{k} \left[\ln \left(\frac{dI}{dV} \right) \right]^{-1}$, вычисленной из данных туннельных ВАХ вблизи краев энергетической щели в поверхностной плотности состояний для образцов n - и p -типа с $\rho = 1 \text{ } \Omega\text{см}$. Прерывистая линия описывает вид теоретической кривой полученной по формуле (1), наклон кривой аппроксимирующей экспериментальные данные в 2.5 больше.

данная величина флуктуации действительно линейно зависит от температуры, однако коэффициент пропорциональности не единица, а примерно в два с половиной раза больше предсказанного формулой (1). При этом зависимость хорошо повторяется на образцах n - и p -типа. Кроме того, при нулевой температуре наблюдается конечная величина флуктуаций величиной $\sim 40 \text{ К}$.

В третьем разделе приводится анализ возможных сценариев образования энергетической щели в плотности поверхностных состояний реконструкции Si(111) – 7×7 при низких температурах основываясь на полученных в диссертации результатах и данных опубликованных в литературе.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Для проведения исследований свойств электронного транспорта в поверхностных структурах разработано СВВ устройство на основе крио-

генератора замкнутого цикла. Устройство позволяет проводить измерения поверхностной проводимости четырехзондовым методом и ее зависимости от температуры. Основные характеристики: температурный диапазон измерений 35 К до 300 К, сопротивление образцов до 10 ГΩ, использование микрозондов любой геометрии.

2. С помощью данного устройства проведены измерения четырехзондовым методом поверхностной проводимости реконструкции Si(111)–7×7 в ранее неизученном диапазоне температур от 35 К до 90 К. Обнаружено, что в данном диапазоне зависимость поверхностной проводимости от температуры имеет активационный характер с энергией активации $\epsilon_a = 25 \pm 2.5$ мэВ для образцов кремния *n*-типа с $\rho = 1$ Ωсм, $\rho = 0.3$ Ωсм и образцов *p*-типа с $\rho = 1$ Ωсм.
3. Предложена и продемонстрирована методика измерений топографии поверхности методом СТМ и туннельной плотности состояний методом СТС на слаболегированных образцах кремния при температуре жидкого гелия с использованием внешнего освещения образца источниками света.
4. Проведены измерения туннельной плотности поверхностных состояний для образцов кремния *n*- и *p*-типа с $\rho = 1$ Ωсм. Обнаружена особенность на уровне Ферми в плотности поверхностных состояний реконструкции Si(111)–7×7 в виде энергетической щели величиной $2\Delta = 40 \pm 10$ мэВ при температуре $T = 5$ К, одинаковой для слаболегированных образцов кремния *n*- и *p*-типа.
5. Проведены измерения туннельных спектров плотности поверхностных состояний реконструкции Si(111)–7×7 в зависимости от температуры образца в диапазоне от 5 К до 78 К. Обнаружено, что щель постепенно

размывается с ростом температуры и исчезает при $T > 40\text{К}$. Проведена оценка флуктуационного размытия энергетической щели, разделены вклады метода измерений и тепловых флуктуаций, присущих самой щели.

Список публикаций

- [1] *А.Б. Одобеско, Б.А. Логинов, В.Б. Логинов, В.Ф. Насретдинова, С.В. Зайцев-Зотов.* Сверхвысоковакуумное устройство для измерения проводимости поверхностных структур четырехконтактным методом на основе рефрижератора замкнутого цикла // Приб. и техн. эксп. — 2010. — №3. — С. 152-158.
- [2] *А.Б. Одобеску, А.А. Rogozin, С.В. Зайцев-Зотов.* Температурные зависимости проводимости и туннельной плотности состояний поверхностной реконструкции Si(111) — 7×7 в слаболегированных образцах кремния // Журнал Радиоэлектроники (электронный журнал) — 2012. N9 <http://jre.cplire.ru/jre/sep12/4/text.pdf>
- [3] *A.B. Odobescu and S.V. Zaitsev-Zotov.* Energy gap revealed by low-temperature scanning-tunnelling spectroscopy of Si(111) — 7×7 surface in illuminated slightly-doped crystals // J. Phys.: Condens. Matter — 2012. — V. 24. — P. 395003.
- [4] *А.Б. Одобеску, С.В. Зайцев-Зотов.* Влияние одноэлектронного туннелирования на спектр СТС на примере поверхности кремния Si(111) — 7×7 // X Российская конференция по физике полупроводников, сб. науч. тр. — Н. Нов., 2011. — Т. 1. — С. 31.
- [5] *А. Б. Одобеско, В. Ф. Насретдинова, С. В. Зайцев-Зотов, Б. А. Логинов, В. Б. Логинов.* Сверхвысоковакуумная система измерения проводимости на основе рефрижератора замкнутого цикла // Международный симпозиум „Физика низкоразмерных систем“, сб. науч. тр. — Ростов-на-Дону, 2008. — С. 229-231.
- [6] *А. Б. Одобеско, С.В. Зайцев-Зотов.* Низкотемпературная туннельная

спектроскопия энергетической структуры поверхности Si(111) – 7×7 слаболегированного кремния // XV Международный симпозиум „Нанопизика и наноэлектроника“, сб. науч. тр. — Н. Нов., 2011. — Т. 2. — С. 570-571.

Цитированная литература

- [1] *J.W. Wells, J.F. Kallehauge, T.M. Hansen, and Ph. Hofmann.* Disentangling Surface, Bulk, and Space-Charge-Layer Conductivity in Si(111) – 7×7 // Phys. Rev. Lett. — 2006. — V. 97. — P. 206803.
- [2] *T. Tanikawa, K. Yoo, I. Matsuda, S. Hasegawa.* Nonmetallic transport property of the Si(111) – 7×7 surface // Phys. Rev. B — 2003. — V. 68. — P. 113303.
- [3] *K. Yoo and H.H. Weitering.* Electrical conductance of reconstructed silicon surfaces // Phys. Rev. B — 2002. — V. 65. — P. 115424.
- [4] *M. D'angelo, K. Takase, N. Miyata, T. Hirahara, S. Hasegawa, A. Nishide, M. Ogawa, I. Matsuda.* Conductivity of the Si(111) – 7×7 dangling-bond state // Phys. Rev. B — 2009. — V. 79. — P. 035318.
- [5] *К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма.* Введение в физику поверхности. — М. : НАУКА, 2006. - 318 с.
- [6] *J. Myslivecek, A. Strozecka, J. Steffl, P. Sobotik, I. Ostadal, B. Voigtlander.* Structure of the adatom electron band of the Si(111) – 7×7 surface // Phys. Rev. B — 2006. — V. 73. — P. 161302.
- [7] *S. Modesti, H. Gutzmann, J. Wiebe, R. Wiesendanger.* Correction of systematic errors in scanning tunneling spectra on semiconductor surfaces: The energy gap of Si(111) – 7×7 at 0.3 K // Phys. Rev. B — 2009. — V. 80 — P. 125326.

- [8] *R.J. Hamers, R.M. Tromp, J.E. Demuth.* Surface Electronic Structure of Si(111) — 7×7 Resolved in Real Space // Phys. Rev. Lett. —1986. — V. 56. — P. 1972.