

На правах рукописи



Филиппов Владимир Владимирович

**ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПЕРЕНОСА
В АНИЗОТРОПНЫХ И НИЗКОРАЗМЕРНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ**

Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Липецк – 2012

Работа выполнена в Липецком государственном педагогическом университете

Научный консультант: Бормонтов Евгений Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: Астапенко Валерий Александрович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Московский физико-технический институт,
зам. зав. кафедрой радиоэлектроники и прикладной
информатики;

Калинин Юрий Егорович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Воронежский государственный технический
университет, зав. кафедрой физики твердого тела;

Безрядин Николай Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
Воронежский государственный университет
инженерных технологий, зав. кафедрой физики.

Ведущая организация: Национальный исследовательский университет
ФГБОУ ВПО «Московский энергетический
институт».

Защита состоится 21 февраля 2013 года в 15²⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.038.10 при Воронежском государственном
университете по адресу: 394006, Воронеж, Университетская пл., 1, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государ-
ственного университета.

Автореферат разослан «27» декабря 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Маршаков Владимир Кириллович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современной полупроводниковой электронике и нанoeлектронике широкое применение получили пленки различной структуры, причем зачастую физические свойства материалов имеют тензорный характер. Анизотропия свойств полупроводниковых пленок может быть обусловлена естественной структурой кристаллической решетки (SiC, GaN, CdAs₂, ZnAs₂, Zn₂P₃ и др.), влиянием деформаций, воздействием внешних полей (электрических, магнитных, механических) или размерными эффектами. Необходимо отметить, что электропроводность в различных направлениях кристалла может отличаться более чем на один или два порядка. Многие анизотропные материалы перспективны при создании р-п переходов, источников спонтанного излучения, поверхностно-барьерных и МДП-структур, солнечных фотоэлементов, измерительных устройств и других приборов. Большое применение в полупроводниковой электронике имеют слоистые полупроводниковые структуры. Слоистые полупроводники могут быть использованы для создания лазеров, модуляторов света, фотодетекторов и функциональных устройств, управляемых магнитным полем. Применение этих материалов в электронике требует разработки простых и надежных методов исследования их физических свойств. При исследовании свойств материалов электроники для их практического применения необходимо знать макроскопическое распределение потенциала электрического поля в области образца или полупроводниковой структуры. Наличие аналитических выражений для потенциала поля в области пленки позволяет определять такие важные параметры, как сопротивление растекания и величину сопротивления контактов, что дает возможность правильно оценивать экспериментальные данные при зондовых методах исследования и контроля свойств материалов.

В полупроводниковой электронике все большее применение получают многослойные искусственно анизотропные структуры, в которых электропроводимость в различных областях полупроводника не одинакова. В частности, в настоящее время в микро- и нанoeлектронике широкое применение получили структуры кремний на германии, в которых в результате рассогласования постоянных решеток симметрия кристалла кремния понижается, и пленка становится анизотропной. Весьма актуальным является вопрос зависимости свойств напряженного кремния от соотношения толщин пленок кремния и германиевой подложки. Интерес к этим структурам обусловлен возможностью управления широким спектром физических свойств, изменением величины деформации и толщин контактирующих полупроводников. Несоответствие постоянных решеток пленки и подложки вызывает деформации растяжения в кремнии и значительные изменения электрофизических свойств напряженных кремниевых каналов транзисторов. Однако на данный момент в литературе отсутствует достаточно полная модель, описывающая влияние деформации растяжения в кремнии на свойства канала в МОП-структуре.

На современном этапе развития приборов микроэлектроники значительное применение получили пленки на изолирующих подложках. При исследовании и практическом применении тонких пленок возникает необходимость контроля их удельного сопротивления, а также качества металлических контактов к ним. Поэтому сохраняется необходимость в теоретическом обосновании и разработке

надежных неразрушающих методов исследования полупроводниковых пленок и свойств металлических контактов к ним.

Разработка и внедрение в промышленность новых технологических процессов производства полупроводниковых материалов и структур стимулировали развитие и совершенствование методов исследования анизотропных и неоднородных полупроводников. При этом требуется проводить исследования тех структур, которые непосредственно применяются в полупроводниковых приборах. Особенно необходимы быстрые неразрушающие методы контроля параметров массивных профилированных кристаллов и легированных слоев, в том числе ионно-внедренных и полученных с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии. В соответствии с этим в диссертации проведен физико-математический анализ распределений потенциала поля постоянного тока в анизотропных и неоднородных структурах, и на этой основе получили дальнейшее развитие контактные методы исследования полупроводниковых материалов.

В настоящее время полупроводниковая технология переходит на уровень нанотехнологии. Молекулярные и одноэлектронные приборы становятся реальными структурными элементами электроники. Известно, что одним из основных свойств низкоразмерных структур является анизотропия электрических и магнитных параметров. Схемы на основе молекул и малых кластеров обеспечивают как признанные преимущества одноэлектронных систем нанoeлектроники (возможность построения цифровых систем с принципом кодирования информации одиночными электронами, предельно малое энергопотребление в таких структурах), так и достижение высокой (до 300 К) рабочей температуры. Самым распространенным материалом современной электроники является кремний. Естественно полагать, что различные наноформы кремния можно использовать в качестве структурных элементов нанотранзисторов, выпрямляющих элементов, а также других нанoeлектронных приборов. Согласно литературным данным, при теоретическом анализе кремниевых наноструктур на подложках обычно учитывают только обрыв кристаллической решетки в одном или двух направлениях, но не конечное число атомов и наличие подложки. Использование некоторых общих модельных представлений о квантовых объектах не всегда позволяет объяснять возникающие эффекты и особенности тех или иных наноструктур.

Таким образом, задача исследования кинетических и контактных явлений в анизотропных и низкоразмерных полупроводниках является актуальной и служит повышению эффективности лабораторных исследований и промышленного контроля качества полупроводниковых материалов.

Цель работы: установление общих закономерностей и особенностей кинетических явлений, связанных с переносом заряда в анизотропных и низкоразмерных полупроводниковых структурах, развитие методик исследования и контроля свойств анизотропных полупроводников и структур на их основе.

В соответствии с целью поставлены и решены следующие задачи:

- разработать теоретические методики расчетов выражений для распределений потенциала поля стационарного электрического тока в анизотропных полупроводниках;
- исследовать особенности распределения электрического поля в анизотропных по-

- лупроводниках, теоретически объяснить экспериментально известные явления квазихолловского поля и концентрирования тока проводимости;
- изучить распределение электрического потенциала в ограниченных анизотропных полупроводниках при гальваномагнитных явлениях;
 - разработать и теоретически обосновать методы исследования эффектов Холла и Гаусса в анизотропных полупроводниках;
 - разработать надежные неразрушающие методы исследований удельной электропроводности и подвижности носителей заряда в полупроводниках с учетом анизотропии и неоднородности образцов;
 - теоретически и экспериментально исследовать резистивные свойства металлических контактов к полупроводниковым кристаллам и пленкам;
 - исследовать особенности энергетического спектра и распределений электрических полей в искусственно анизотропных полупроводниковых структурах Si/Ge;
 - определить атомарное и электронное строение, а также исследовать энергетическую стабильность структур кремниевых нановолокон;
 - исследовать влияние металлических примесей и внешних полей на энергетическую стабильность, электронные и кинетические свойства кремниевых кластеров и наноструктур.

Научная новизна диссертационной работы определяется полученными оригинальными результатами и состоит в следующем.

1. Разработана методика решения краевых электродинамических задач с граничными условиями в виде наклонной производной путем использования комплексных рядов Фурье в применении к распределению холловского потенциала в анизотропных полупроводниках. Впервые для расчета поля постоянного тока в анизотропном полупроводнике применен метод электрических изображений.

2. Получены выражения для распределения потенциала в ограниченных анизотропных проводящих средах на плоскости и в пространстве, позволяющие исследовать следующие явления: поперечное напряжение анизотропии, концентрацию тока проводимости, сопротивление растекания контактов к анизотропным полупроводникам. Данные явления объяснены с помощью модели вихревых токов анизотропии. Впервые получены выражения для сопротивления растекания анизотропных полупроводников.

3. Путем единого теоретического подхода получены выражения для электрического потенциала в анизотропных полупроводниках с точностью до членов, содержащих квадрат индукции внешнего магнитного поля при произвольном положении токовых электродов на периметре прямоугольных образцов.

4. Разработаны оригинальные методики исследований эффектов Холла и Гаусса в анизотропных полупроводниках. На основе теоретических исследований эффекта Холла в анизотропных полупроводниковых кристаллах и пленках доказано, что в анизотропных образцах на величину э.д.с. Холла оказывает существенное влияние поперечное напряжение анизотропии. Впервые показано, что в линейном приближении по величине индукции внешнего магнитного поля приближение Ван-дер-Пау справедливо для анизотропных полупроводников.

5. Разработаны и теоретически обоснованы оригинальные методы измерений электрофизических свойств полупроводников: восьмизондовые методы измерений

электропроводимости анизотропных полупроводников, комбинированный четырехзондовый метод измерения электропроводимости слоистых полупроводниковых материалов. Предложены методики исследования эффектов Холла и Гаусса в полупроводниках с тензорным характером проводимости.

6. Проведено физико-математическое обоснование новых методов исследования свойств контактов к полупроводникам: сопротивления растекания круглого контакта, сопротивления металлических контактов к полупроводниковым пленкам. Предложена методика измерения сопротивления контактов к неоднородным полупроводниковым структурам, а также измерения электропроводимости неоднородных образцов; рассмотрены практически важные случаи, когда электропроводимость в пленке изменяется с глубиной по экспоненциальному закону, а также описывается функцией Гаусса.

7. Впервые показано теоретически, что влияние деформаций в напряженных пленках n-Si на подложках Ge приводит к двукратному увеличению подвижности по направлению растяжения пленки кремния. Исследования распределения электрического поля в анизотропных каналах транзисторов на основе напряженного кремния показали наличие эффекта концентрирования тока проводимости. Получена модель оптимизированной атомной структуры и расчета электронных характеристик напряженных кремниевых нанокластеров Si на германиевой подложке; показано влияние деформации и подложки на распределение электронных состояний.

8. Впервые получены результаты оптимизации атомной структуры и расчета электронных и транспортных характеристик сфероидальных кремниевых кластеров и кремниевых наночастиц, инкапсулированных атомами переходных металлов. На основе квантовохимических расчетов показана энергетическая стабильность кремниевых сфероидальных кластеров. Обнаружено увеличение энергии связи кремниевых наноструктур с малым числом атомов при инкапсулировании их атомами переходных металлов. Показано влияние внешнего электрического поля и заряда на энергетический спектр и кинетические свойства кремниевых наноструктур.

9. Выполнена оценка смещений уровней энергетического спектра в прямоугольной квантовой яме, в которой имеется дополнительный провал, расположенный несимметрично относительно стенок ямы, служащая основой при расчетах контрастности ВАХ туннельно-резонансных структур. Показано, что для расчета смещения положений основного и первого возбужденного уровней необходимо учитывать конечную глубину потенциальной ямы. Определена зависимость области локализации электрона от потенциального рельефа квантовой ямы.

Научная и практическая ценность. В диссертации разработан общий и строгий путь решения определенных типов краевых задач электродинамики в применении к полупроводниковым материалам электронной техники. В частности, разработана оригинальная методика решения задач с граничными условиями в виде наклонной производной на ограниченной плоскости. Представленные математические решения позволяют производить анализ распределений потенциала и плотности постоянного электрического тока в ограниченных анизотропных и неоднородных полупроводниках, выполнять расчет и моделирование соответ-

ствующих полей.

Предложена простая методика определения компонент тензора удельной электропроводности и подвижности носителей заряда в слоистых полупроводниковых материалах. Представленная методика проверена экспериментально. Уравнения, используемые для расчета электропроводности, получены на основе решения соответствующих краевых электродинамических задач и могут быть применимы при исследовании слоистых и анизотропных полупроводниковых кристаллов различных типов.

Разработана и теоретически обоснована методика измерения сопротивления контактов к неоднородным по глубине полупроводниковым структурам, которая позволяет также производить измерения удельной электропроводности образцов. Рассмотрены практически важные случаи, когда электропроводность в пленке изменяется с глубиной по экспоненциальному закону, а также описывается функцией Гаусса.

Предложен и экспериментально осуществлен капельный метод электрохимического осаждения тонких слоев никеля на кремнии. Предложена методика определения переходного сопротивления контакта металл-полупроводник по результатам измерения сопротивления растекания. Представлены результаты теоретических расчетов сопротивления растекания для контактов малой площади. Проведена оценка влияния размеров контактной области на величину сопротивления растекания. Расчетные формулы приведены к виду, удобному для практического применения. Предложенная методика практически испытана при измерениях сопротивления никелевых контактов на кремнии.

Предложенные модели деформаций в многослойных кремний-германиевых структурах позволяют моделировать электрические поля в области канала МОП-структуры. Рассмотрены резистивные свойства каналов МОП-структур на основе напряженного кремния.

На основании выполненных расчетов свойств кремниевых наночастиц могут быть предложены приборы одноэлектроники, работающие при комнатной температуре. Учтены влияния силовых полей, наличие примесей и подложки на основные транспортные свойства рассматриваемых наноструктур.

Результаты диссертационных исследований используются на кафедре физики Липецкого государственного педагогического университета в учебном процессе (в курсовых и выпускных квалификационных работах, в специальном лабораторном практикуме), а также, в созданной автором, научной лаборатории методов измерения электрофизических характеристик анизотропных полупроводников.

Обоснованность научных положений и выводов обеспечена четкой формулировкой соответствующих краевых задач и выбором надежных теоретических методов их решения. Достоверность результатов определяется построением физических моделей с учетом основных явлений, определяющих свойства процессов или объектов, и многократной экспериментальной проверкой. Экспериментальные результаты дополнены в ряде случаев данными компьютерного моделирования. Полученные результаты и выводы согласуются с известными результатами других авторов.

Следует отметить, что все разработанные в диссертации алгоритмы реализованы автором в виде пакетов прикладных программ в средах MathCad и MatLab,

при написании которых использовались стандартные библиотечные подпрограммы. Результаты квантовохимических расчетов, приведенные в главе 4, выполнены на базе «свободных» программ (PC-GAMESS, MPQC, GHEMICAL, MOLEKEL).

Положения и результаты, выносимые на защиту

- 1.** Решение нестандартной краевой задачи электродинамики с граничным условием в виде наклонной производной и теоретическое выражение в виде ряда аналитических функций для трехмерного распределения потенциала электрического поля зондовых контактов в объеме анизотропного образца. Разработанная макроскопическая теория объясняет явление концентрирования плотности тока и эффект возникновения поперечного напряжения в отсутствии магнитного поля в анизотропных полупроводниковых образцах с монополярной проводимостью, вырезанных под углом к главным осям тензора электропроводности.
- 2.** Методика расчета холловского потенциала в анизотропных полупроводниках, объединяющая метод разделения переменных с комплексными рядами Фурье, позволившую развить макроскопическую теорию эффектов Холла и Гаусса в анизотропных полупроводниках. В рамках разработанной теории показано, что для случая высокоомных токовых контактов магнитное поле не изменяет распределение плотности тока, следовательно, метод Ван дер Пау измерения э.д.с. Холла применим и к анизотропным полупроводникам.
- 3.** Контактные методики определения компонент тензоров электропроводности и коэффициента Холла анизотропных и слоистых полупроводниковых структур; методика определения электропроводности полупроводниковых анизотропных пленок, в которых распределение примесей по глубине изменяется по экспоненциальному и гауссову законам; методики контроля сопротивлений растекания токовых контактов к анизотропным полупроводникам и полученные выражения в виде рядов аналитических функций для сопротивлений растекания.
- 4.** Результаты расчета зонных диаграмм гетероперехода Si–Ge для псевдоморфных пленок Ge на подложке Si и пленок Si на подложке Ge в рамках теории деформационного потенциала и установленные на основе моделирования электронных свойств гетероперехода закономерности: смещение дна зоны проводимости долины Δ_1 в пленке кремния приводит к двукратному возрастанию подвижности электронов; электрический ток в канале растянутого n-Si с анизотропией проводимости протекает по более узкой области, чем в недеформированном кристалле; на границе раздела нанокластер кремния – подложка германия в области нанокластера возникает эффективный положительный заряд.
- 5.** Результаты расчета энергетических диаграмм туннельно-резонансных структур, показывающие, что контрастность ВАХ резонансно-туннельных диодов максимальна при соблюдении следующих условий: имеется глубокая потенциальная яма для электронов, дополнительный потенциальный провал расположен посредине потенциальной ямы, в области дополнительного провала эффективная масса электрона значительно меньше, чем в остальной области.
- 6.** Квантовомеханическая одноэлектронная модель кремниевых нанотрубок, заполненных атомами металлов, учитывающая анизотропию эффективной массы свободных электронов. В рамках построенной модели показано: с ростом отношения продольной эффективной массы к поперечной плотность состояний и квазиимпульс Ферми электронов проводимости сдвигаются в область больших значений; расстояние между энергетическими уровнями электронов в нанотрубке про-

порционально величине $R^{-1/2}$, а число уровней пропорционально $R^{3/2}$ (R - радиус нанотрубки).

Апробация результатов работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на 1-ой Российской конференции молодых ученых по физическому материаловедению (Калуга, 2001), Международной конференции «Физика электронных материалов» (Калуга, 2002), Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях молодых ученых «Микроэлектроника и информатика» (Зеленоград, 2003, 2007), VII-ом Международном научно-техническом семинаре «Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий» (Обнинск, 2003), Международной конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современной науки» (Самара, 2003), IV Международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики» (Саранск, 2003), Международных конференциях по физике кристаллов «Кристаллофизика 21-го века» (Москва, 2003, 2006), Международных научных семинарах «Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах» (Воронеж, 2004, 2007), Международных научных семинарах «Физико-математическое моделирование систем» (Воронеж, 2004, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011), IV Международной научно-технической конференции «Материалы и технологии XXI века» (Пенза, 2006), Международных научно-технических семинарах «Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах» (Москва, 2005, 2011), 5-ой Международной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в системе образования» (Тамбов, 2007), Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания» (Липецк, 2006), Міжнародні конференції «Нанорозмірні системи. Будова – властивості – технології» (Київ, 2007), Международных конференциях «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2008, 2009, 2011), Всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях» (Москва, 2008), Международной научно-технической конференции «Микроэлектроника и наноинженерия» (Зеленоград, 2008), Всероссийской конференции «Неравновесные процессы в природе» (Елец, 2010), Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 2011), Международной школе «Физическое материаловедение» (Тольятти, 2011), Международном семинаре «Синтез, свойства и применение графенов и слоистых наносистем» (Астрахань, 2011), Всероссийской конференции «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Москва, 2012).

Публикации автора по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 105 работ, среди которых: 26 статей в изданиях, соответствующих перечню ВАК рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук, 6 статей в прочих периодических изданиях (вестниках вузов), 41 статья в материалах докладов конференций, 21 работа в тематических межвузовских сборниках, 8 тезисов докладов на конференциях, 1 монография, 2 учебных пособия.

Личный вклад автора выразился в следующем. Все основные результаты диссертации получены лично автором. 12 основных работ опубликовано без соавторов. Из работ с соавторами в диссертацию включены только те результаты, вклад автора в которые был определяющим и включал в себя: постановку задачи, разработку методик и алгоритмов ее решения, формулирование основных выводов и результатов работы, а также оформление их в виде научных статей в журналы или представление в виде докладов на конференции.

Научные гранты, имеющие отношение к выполнению данной работы:

Гранты Министерства образования и науки РФ: в рамках тем. планов «Разработка физических методов исследования и контроля свойств полупроводниковых структур современной электроники» (2007-2009 г.г.), «Исследование явлений электронного переноса в материалах современной электроники и нанoeлектроники» (2010 г.), «Явления электронного переноса в субмикронных полупроводниковых структурах» (2011 г.); гос. задания «Явления электронного переноса в анизотропных и низкоразмерных полупроводниковых структурах» (2012 г.).

Проект НИР в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме «Создание наноструктур методом атомно-слоевого осаждения для электроники и медицины» по гос. контракту 02.740.11.0786 (2012 г.).

Гранты Администрации Липецкой области: «Разработка физических методов исследования и контроля качества полупроводниковых материалов электроники» (2007 г.), «Исследование кинетических явлений в полупроводниковых пленках и наноструктурах» (2008 г.).

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из Введения, 4 глав, Заключения, Списка использованной литературы из 352 наименований на 33 страницах. Объем диссертации составляет 317 страниц основного текста, включая 118 рисунков и 20 таблиц на 59 страницах.

В начале каждой главы приводится обзор современного состояния исследований по соответствующей тематике; разделам глав (кроме обзорных) предшествуют аннотации с указанием публикаций автора по излагаемому материалу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность темы, обозначена цель работы и методы исследования, определена ее научная новизна, положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика работы.

Первая глава диссертации посвящена исследованию макроскопических явлений электронного переноса в анизотропных полупроводниковых кристаллах и пленках. Как показывает обзор, выполненный в первой части главы 1, многие полупроводниковые соединения обладают ярко выраженной анизотропией физических свойств и уже находят практическое применение в функциональной электронике. В разделе 1.1 также произведен обзор явлений электронного переноса в полупроводниках, связанных с тензорным характером электропроводимости. Рас-

смотрен спектр основных наблюдаемых явлений в анизотропных полупроводниках и сложности, связанные с их объяснением. Как показывает проделанный обзор, на практике весьма важны макроскопические распределения потенциала и плотности электрического тока, позволяющие определять величины кинетических коэффициентов и моделировать работу полупроводниковых структур.

В соответствии с поставленными целями диссертационного исследования в разделе 1.2 производится оригинальный теоретический анализ распределения потенциала в ограниченных полупроводниках с тензорным характером электропроводности. Для первоначального качественного анализа распределения электрического поля выбрана бесконечная и полубесконечная анизотропная полупроводниковая пластина.

Проанализировано распределение электрического потенциала в тонкой пленке толщиной d , главные компоненты тензора удельной электропроводности, которые имеют значения σ_x и σ_y (рис. 1).

Исходя из условия тонкой пластины, распределение потенциала можно считать двумерным. Следовательно, уравнение для потенциала примет вид:

$$\sigma_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

В результате получаем потенциал точечного зонда, расположенного на поверхности анизотропной пленки в начале координат:

$$\varphi = \frac{I}{4\pi d \sqrt{\sigma_x \sigma_y}} \ln \left(\frac{x^2 + y^2}{\sigma_x \sigma_y} \right) + C_2. \quad (2)$$

Соответственно, распределение потенциала поля, создаваемого двумя токовыми зондами 2 и 4, примет следующий вид:

$$\varphi = \frac{I}{4\pi d \sqrt{\sigma_x \sigma_y}} \ln \frac{(x - l_1 \cos \alpha)^2 + \gamma^2 (y - l_1 \sin \alpha)^2}{(x + l_1 \cos \alpha)^2 + \gamma^2 (y + l_1 \sin \alpha)^2}, \quad (3)$$

где $\gamma = \sqrt{\sigma_x / \sigma_y}$ – параметр анизотропии, α – угол между линией токовых зондов и кристаллофизической осью.

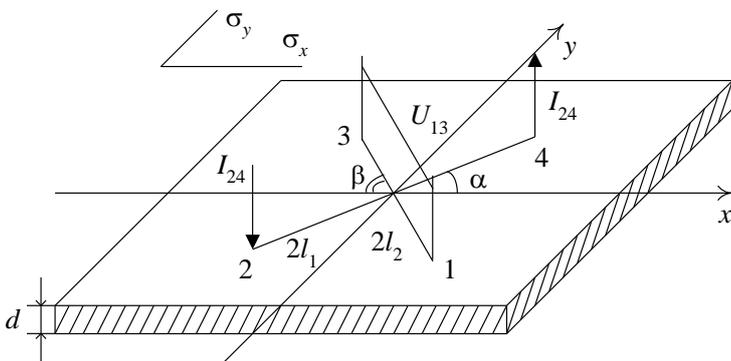


Рис. 1. Схема расположения зондов на анизотропной пленке толщиной d .

Полученное распределение потенциала (3) позволяет определить проекции и ротор вектора плотности тока \mathbf{j} и напряженности \mathbf{E} в образце:

$$\text{rot}_z \mathbf{j} = \frac{\partial j_y}{\partial x} - \frac{\partial j_x}{\partial y} = (\sigma_x - \sigma_y) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}; \quad \text{rot } \mathbf{E} = 0. \quad (4)$$

Данные выражения указывают на наличие в образце вихревых токов анизотропии (ВТА), хотя электрическое поле \mathbf{E} является потенциальным. Действитель-

но, т.к. $(\sigma_x - \sigma_y) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} = 0$ только в случае $\sigma_x = \sigma_y$, что соответствует изотропному образцу, то наличие вихревых токов, таким образом, обусловлено только анизотропией образца, а их конфигурация будет определяться относительным расположением кристаллографических осей и линии токовых зондов. Показано, что наличие вихревых токов ведет к эффектам концентрирования или растекания тока по анизотропному образцу, рассмотренным в четвертой части первой главы.

Выражение (3) позволяет проанализировать распределение потенциала и плотности тока в анизотропных пластинах. Из (3) непосредственно определяется разность потенциалов U_{13} между симметричными точками относительно токовых зондов ($\beta=90-\alpha$):

$$U_{13} = \frac{I}{2\pi d \sqrt{\sigma_x \sigma_y}} \ln \frac{l_1^2 + l_2^2 - (1-\gamma^2)(l_1 \sin \alpha - l_2 \cos \alpha)^2}{l_1^2 + l_2^2 - (1-\gamma^2)(l_1 \sin \alpha + l_2 \cos \alpha)^2}. \quad (5)$$

Следовательно, поперечное напряжение анизотропии (ПНА) будет отлично от нуля только в случае, когда $\sin 2\alpha \neq 0$, а это соответствует случаю, когда главные кристаллографические направления тензора электропроводности не совпадают с линией токовых зондов. На основании вышесказанного следует одно из возможных практических применений ПНА – определение ориентации кристаллографических направлений анизотропных пленок и монокристаллов относительно грани образцов.

При решении электродинамических задач часто возникает необходимость учета влияния границ сред на распределение потенциала. В случае простых границ изотропных образцов (плоская граница, круг и т.д.) хорошо зарекомендовал себя метод электрических изображений. В соответствии с вышеуказанным, для учета влияния границ анизотропной пленки впервые был использован метод электрических изображений.

Для наиболее полного анализа был рассмотрен случай, когда монокристалл вырезан так, что направления главных компонент тензора электропроводности составляют угол Θ с границами образца, толщина образца d значительно меньше его длины a и ширины b , а токовые контакты 1, 2 изготовлены на периметре образца по всей его толщине (рис. 2).

Уравнение для двумерного потенциала электрического поля в образце имеет вид:

$$\sigma_{xx} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \sigma_{yy} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + 2\sigma_{xy} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} = 0. \quad (6)$$

Граничные условия для потенциала следуют из требования равенства нормальной составляющей нулю всюду на поверхности образца, кроме точек под токовыми электродами:

$$\left(\sigma_{xx} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \sigma_{xy} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \Big|_{x=0,a} = \begin{cases} 0, y \in [0; b_{1,2} - c) \cup (b_{1,2} + c; b]; \\ -\frac{I_{12}}{2cd}, y \in [b_{1,2} - c; b_{1,2} + c]; \end{cases} \quad \left(\sigma_{yy} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \sigma_{xy} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \Big|_{y=0,b} = 0. \quad (7)$$

Показано, что решение краевой задачи (6), (7) представляется в виде комплексного ряда Фурье:

$$\varphi(x,y) = \sum_{n=0,\pm 1,\pm 2,\dots} X_n(x) \cdot \exp(i\beta_n y), \quad \beta_n = \pi n/b. \quad (8)$$

Действительная часть ряда (8) имеет смысл электрического потенциала.

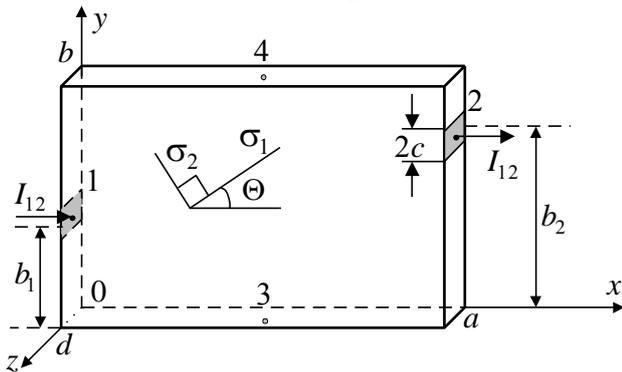


Рис. 2. Анизотропный полупроводниковый образец с токовыми электродами.

В разделе 1.3 проведен теоретический анализ распределения потенциала в ограниченных полупроводниковых кристаллах с тензорным характером электропроводности. Решены задачи с различным видом граничных условий, позволившие определить распределение потенциала в анизотропном кристалле, расположенном на металлической, полупроводниковой и диэлектрической подложках. Для прямоугольного образца, вырезанного вдоль главных осей тензора электропроводности, получены выражения для потенциала электрического поля при произвольном положении токовых электродов на его периметре.

При промышленном и лабораторном производстве полупроводниковых материалов часто образцы получают в виде цилиндров или дисков. В связи с этим получено распределение потенциала токового зонда в анизотропных полупроводниковых цилиндрах. Рассмотрены практически важные случаи, когда полупроводник находится на металлической и полупроводниковой подложках.

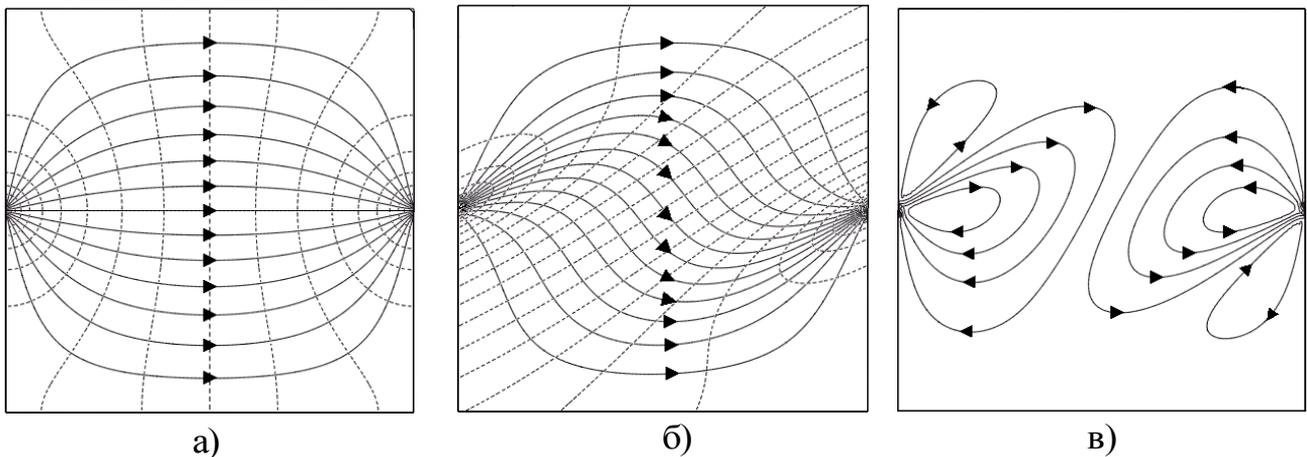


Рис. 3. Модели электрического поля, тока проводимости (а, б) и ВТА (в) в квадратном образце. Сплошные линии – линии тока; пунктир – эквипотенциали.

Наличие математических выражений для потенциала и плотности тока позволило смоделировать электрическое поле в образцах с помощью ЭВМ. Такое моделирование дает возможность более глубоко исследовать структуру электрического поля в анизотропных полупроводниках, что было сделано в четвертой части первой главы. Пример выполненного моделирования представлен на рис. 3. Здесь рассмотрен квадратный образец ($a=b$) со следующими параметрами анизотропии: $\sigma_1/\sigma_2=10$, $\Theta=\pi/6$; токовые контакты размером $2c=b/20$ расположены на оси симмет-

рии ($b_1=b_2=b/2$). Здесь слева (рис. 3а) – распределение эквипотенциалей и линий тока в изотропном образце, посередине (рис. 3б) – распределение эквипотенциалей и линий тока в анизотропном образце, и справа (рис. 3в) – распределение вихревых токов в анизотропном образце. Как показывает проведенное компьютерное моделирование и теоретический анализ, возникновение вихревой составляющей тока существенно меняет распределение потенциала и плотности тока в анизотропных кристаллах и пленках в сравнении с изотропными образцами.

В разделе 1.5 рассмотрены особенности распределения потенциала в слоистых полупроводниках. Получено распределение потенциала токового зонда к слоистой полупроводниковой пленке. Тензор удельной электропроводности исследуемых материалов в декартовой системе координат представляется в виде:

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\perp} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где σ_{\perp} – значение удельной электропроводности по оси z ; σ_{\parallel} – удельная проводимость по осям x и y . Подобного рода анизотропия может быть вызвана структурой кристалла или влиянием деформаций, а также возникать в квантово-размерных пленках. Получены выражения для распределений потенциала, позволяющие определять область локализации поля токового зонда в случае сканирования анизотропной пленки. Окончательное выражение для распределения потенциала представлено в виде:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{I}{ab} \sum_{n,k=0}^{\infty} [A_{nk} \operatorname{ch}(\eta_{nk}z) + B_{nk} \operatorname{sh}(\eta_{nk}z)] \cos(\alpha_n x) \cos(\beta_k y), \quad (10)$$

где A_{nk} , B_{nk} , α_n , β_n , η_{nk} определены из граничных условий.

Показано влияние размеров и электропроводности на изменение сопротивления растекания зонда в ограниченных пленках. Пример реализации расчетов распределений потенциала и линий тока проводимости представлен на рис. 4.

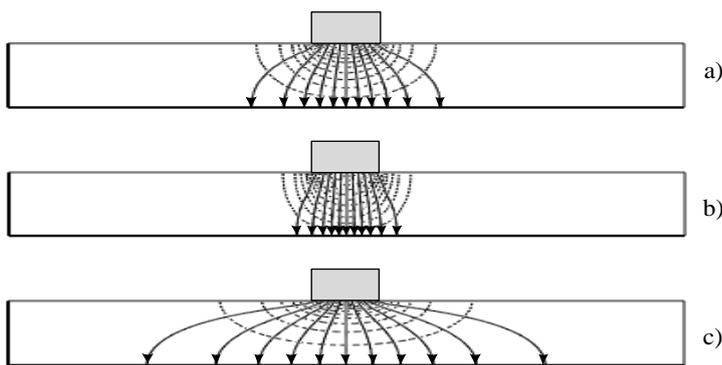


Рис. 4. Модели распределений электрического потенциала (пунктир) и тока (сплошные линии) в анизотропной пленке; ширина верхнего контакта равна толщине анизотропной пленки; нижняя грань заземлена.

- a) $\sigma_{\parallel} = \sigma_{\perp}$;
- b) $\sigma_{\parallel} = \sigma_{\perp} / 5$;
- c) $\sigma_{\parallel} = 5\sigma_{\perp}$.

Рассмотрен способ моделирования электрического поля постоянного тока в ограниченной области прямоугольной формы, состоящей из двух анизотропных элементов с различными электропроводностями $\hat{\sigma}^{(1)}$ и $\hat{\sigma}^{(2)}$. Выражение для потенциала представлено в виде двойного ряда Фурье по косинусам.

Экспериментальная проверка полученных распределений потенциала выполнена на анизотропных монокристаллах диарсенидов кадмия и цинка. Соответ-

ствующие результаты представлены в разделе 1.6. Получено соответствие теоретических распределений потенциала с экспериментальными данными.

Во *второй главе* путем решения соответствующих краевых задач рассмотрены гальваномагнитные явления в ограниченных анизотропных полупроводниках.

В разделе 2.1 диссертации выполнен обзор методов расчета электрических полей в полупроводниках, помещенных в поперечные электрическое и магнитное поля. Выполнен анализ разработанных методик исследования гальваномагнитных эффектов, в том числе и в материалах, обладающих анизотропией проводимости.

Автором в разделе 2.2 производится расчет электрического поля в анизотропных образцах прямоугольной формы при исследовании эффектов Холла и Гаусса. Принцип расчета распределения потенциала рассмотрен на простом примере анизотропного образца прямоугольной формы, помещенного в поперечное магнитное поле (рис. 2, магнитное поле направлено вдоль оси Oz).

Тензор электропроводности анизотропного образца в области относительно слабых магнитных полей удобно представить в виде:

$$\hat{\sigma}_H = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} + R_z B \sigma_1 \sigma_2 \\ \sigma_{xy} - R_z B \sigma_1 \sigma_2 & \sigma_{yy} \end{bmatrix}, \quad k = 1 + \alpha_1 \cdot \mu_1 \mu_2 B^2, \quad (11)$$

где σ_{ij} – компоненты симметричного тензора электропроводности в отсутствии внешнего магнитного поля, μ_1 и μ_2 – дрейфовые подвижности носителей заряда по главным направлениям тензора электропроводности (σ_1 и σ_2 , рис. 2), R_z – компонента тензора коэффициента Холла, α_1 – постоянная магнетосопротивления, определяемая механизмами рассеяния.

В данном случае граничные условия для уравнения (6) принимают вид:

$$\left[\sigma_{xx} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + (\sigma_{xy} + R_z B \sigma_1 \sigma_2) \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right]_{x=0,a} = \begin{cases} 0, & y \in [0; b_{1,2} - c) \cup (b_{1,2} + c; b]; \\ -\frac{I_{12} \cdot k}{2cd}, & y \in [b_{1,2} - c; b_{1,2} + c]; \end{cases} \quad (12)$$

$$\left[\sigma_{yy} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + (\sigma_{xy} - R_z B \sigma_1 \sigma_2) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right]_{y=0,b} = 0. \quad (13)$$

Как известно, решение данной задачи (6), (12), (13) представляет определенные трудности. Нами разработан алгоритм решения задач данного типа с применением аппарата комплексных рядов Фурье. Полученное распределение потенциала с точностью до членов B^2 оказалось возможным представить в виде следующей суммы:

$$\varphi(x, y) = \varphi_0(x, y) + \varphi_H(x, y) + \varphi_M(x, y), \quad (14)$$

где φ_0 – потенциал электрического поля при отсутствии внешнего магнитного поля, φ_H – потенциал холловского электрического поля, φ_M – потенциал электрического поля, возникающего в образце в результате проявления магнетосопротивления. Наличие математических выражений для потенциала позволило также моделировать электрическое поле в образцах с помощью ЭВМ.

В разделе 2.3 определено распределение потенциала при гальваномагнитных явлениях в анизотропных полупроводниках прямоугольной формы в случае зондовых измерений коэффициента Холла. В рассматриваемом случае образец пря-

моугольной формы вырезан так, что его грани параллельны кристаллографическим плоскостям. Образец помещен в поперечное магнитное поле \mathbf{B} , постоянный электрический ток $I_{(12)}$ пропускается через зонды 1 и 2 (рис. 5). В этом случае тензор электропроводности уже не является диагональным:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \sigma_x \sigma_y R_z B & 0 \\ -\sigma_x \sigma_y R_z B & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – компоненты диагонального тензора электропроводности в отсутствии магнитного поля, R_z – компонента тензора коэффициента Холла.

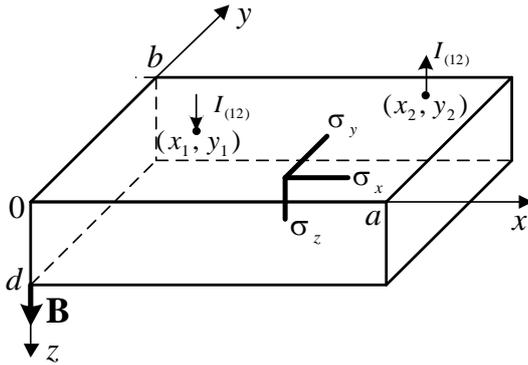


Рис. 5. Схема положения токовых зондов к анизотропному полупроводниковому кристаллу, помещенному в магнитном поле.

При измерениях на постоянном токе, во внешнем постоянном магнитном поле в установившемся режиме, в случае, когда магнитным полем тока можно пренебречь по сравнению с внешним полем, потенциал электрического поля в области образца удовлетворяет следующей краевой задаче:

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = \sigma_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \sigma_z \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (16)$$

$$\left(\sigma_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \sigma_x \sigma_y R_z B \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \Big|_{x=0,a} = 0, \quad \left(\sigma_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \sigma_x \sigma_y R_z B \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \Big|_{y=0,b} = 0, \quad (17)$$

$$\sigma_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=d} = 0, \quad \sigma_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=0} = -I_{(12)} \cdot [\delta(x - x_{(1)}) \cdot \delta(y - y_{(1)}) - \delta(x - x_{(2)}) \cdot \delta(y - y_{(2)})], \quad (18)$$

где \mathbf{j} – вектор плотности тока; a, b, d — длина, ширина и толщина образца; $\delta(x), \delta(y)$ — дельта-функция Дирака, использование которой оправдано для токовых зондов с малой площадью входных сечений. Граничные условия (17), (18) определены из требования, что нормальная составляющая вектора плотности тока к поверхности образца отлична от нуля лишь под токовыми зондами.

Следует отметить, что данная краевая задача (16) – (18) не принадлежит к числу типичных краевых задач Дирихле или Неймана. На сегодняшний день точное математическое решение данной задачи отсутствует. Однако, в связи с тем, что уже при постановке краевой задачи использовалось предположение о линейности потенциала φ по B , то ее решение можно представить в линейном приближении по магнитному полю. Таким образом, искомый потенциал можно представить в следующем виде:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_B, \quad (19)$$

где φ_0 – потенциал электрического поля в отсутствии внешнего магнитного поля, φ_B – потенциал поля Холла, которое возникает в образце после включения внеш-

него магнитного поля. При этом каждое из составляющих поля (20) должно удовлетворять уравнению (16).

На основе полученных выражений для распределения потенциала электрического поля в ограниченных анизотропных полупроводниках при наличии магнитного поля в разделе 2.4 разработаны методики измерения коэффициента Холла и физического магнетосопротивления.

При исследовании изотропных материалов э.д.с. Холла \mathcal{E}_H , как правило, измеряют между точками 3 и 4, расположенными симметрично на гранях $y=0, b$ (рис. 2) ближе к середине образца, т. е. при $x \approx a/2$. Расчеты э.д.с. Холла показали, что разность потенциалов между точками 3 и 4 в линейном приближении по величине индукции внешнего магнитного поля определяется выражением:

$$U_{3,4}^H = -\frac{I_{12} \cdot \sigma_{xy}}{\sigma_1 \sigma_2 d} + \frac{I_{12} \cdot R_z B}{d} = U_a + \mathcal{E}_H \cdot \quad (20)$$

Как показывает выполненный теоретический анализ, при исследованиях эффекта Холла в анизотропных пленках и кристаллах необходимо иметь в виду, что даже в случае симметричного расположения измерительных контактов 3, 4 измеренное напряжение $U_{3,4}^H$ является суммой поперечного напряжения анизотропии U_a и э.д.с. Холла \mathcal{E}_H . Теоретический анализ и компьютерное моделирование показали, что в случае пренебрежения шунтирующим влиянием токовых контактов в линейном приближении метод Ван-дер-Пау измерения э.д.с. Холла применим к полупроводникам с тензорным характером проводимости.

Выполненные в первой и второй главах исследования распределения потенциала в анизотропных образцах позволяют измерять компоненты тензоров кинетических коэффициентов данных материалов и более глубоко исследовать анизотропнорезистивные эффекты.

Экспериментальная проверка методик исследования гальваномагнитных эффектов в анизотропных полупроводниках представлена в разделе 2.5. Получено соответствие теоретических и экспериментальных значений в пределах погрешности измерений, которая не превышала 5%.

В *третьей главе* предложены и теоретически обоснованы оригинальные методы измерения и контроля свойств анизотропных полупроводниковых материалов, реализованы различные схемы исследования сопротивления контактов. Обзор, выполненный в разделе 3.1 диссертации, позволяет говорить о необходимости разработки методов исследования анизотропных и неоднородных структур современной электроники.

В разделе 3.2 для электрохимического осаждения никелевых контактов на кремнии предлагается использовать капельный метод, который обладает определенной локальностью и экономичностью. Тонкие пленки никеля на поверхности полупроводника представляют самостоятельный интерес благодаря их магнитным свойствам. Разработана методика быстрого измерения электрических характеристик получаемых контактов и исходных полупроводниковых образцов. Наши опыты показали, что прочность сцепления никеля с кремнием значительно увеличивается, если в данный электролит перед электролизом добавить фтористоводородную кислоту.

Достоинство предлагаемого метода нанесения контактов заключается в том, что отпадает необходимость помещать образец в электролитическую ванну, в связи с этим удобно наносить контакт любой формы и размера на выбранную для этого грань образца. Кроме этого, весь процесс образования металлического контакта на поверхности полупроводника можно наблюдать с помощью микроскопа, объектив которого расположен непосредственно над контактной площадкой.

В разделе 3.3 диссертации разработан метод измерения сопротивления контактов металл-полупроводник и контроля удельного сопротивления полупроводниковых пленок. Полное сопротивление R контакта металл-полупроводник, как известно, можно представить в виде суммы:

$$R=R_0+R_K, \quad (21)$$

где R_0 – сопротивление растекания тока в полупроводнике, R_K – переходное сопротивление контакта. Сущность предлагаемого метода состоит в том, что сопротивление растекания R_0 определяется теоретически. Рассматривается тонкая полупроводниковая пленка, на поверхности которой созданы два одинаковых контакта в форме круга радиусом r_0 на расстоянии L друг от друга. В некоторых практически значимых случаях учтены условия наличия границ.

Для расчета R_0 необходимо знать геометрические размеры и удельное сопротивление материала пленки ρ . Однако, в ряде случаев, требуется произвести измерение удельного сопротивления после изготовления контактов. Полученное распределение потенциала позволяет решить и эту задачу.

Экспериментальная проверка предложенной методики определения сопротивления контактов была произведена на пленках полупроводникового кремния. Определялось значение сопротивления никелевых контактов, полученных методом электрохимического осаждения.

При производстве полупроводниковых материалов на основе кремния и германия первоначально изготавливаются диски из расплава. Впоследствии диски могут дробиться, образуя сектора окружностей, далее под действием различных физических факторов их электропроводность может изменяться, в связи с этим возникает необходимость разработки методов контроля их свойств. В соответствии с вышеуказанным, нами в четвертой части пятой главы определено распределение электрического потенциала в области однородного участка сектора полупроводника, созданное токовыми электродами малой площади, в том числе при холловских измерениях. Полученное распределение потенциала позволяет также контролировать проводниковые свойства пленки в процессе изготовления контактов.

В разделе 3.5 данной работы выполнен расчет распределения электрического тока в случае зондовых измерений на анизотропных пластинах. Теоретически обоснована и предложена методика определений компонент тензора удельной электропроводности анизотропных пленок. Согласно предлагаемой методике измерения проводятся на тонкой анизотропной пластине с помощью квадратного зондового пробника, расположенного таким образом, что его стороны параллельны главным кристаллофизическим направлениям пластины. Преимущество данного метода измерения электропроводности анизотропных пленок состоит в том, что для его применения не требуется создания омических контактов к образцу, возможно измерение проводимости пленок кристаллов различных геометрических размеров. Главное условие применимости метода состоит в том, что обязательно

наличие плоской поверхности.

Разработанные методики определения проводимости сводятся к теоретическому определению экспериментальной связи напряжения и силы тока:

$$U = \frac{I}{\sigma_i} L_i, \quad (22)$$

где L_i – поправочный множитель, определяемый теоретически.

Разработан восьмизондовый метод совместных измерений электропроводности и коэффициента Холла анизотропных полупроводниковых пленок. Предлагаемый в части 3.6 работы метод совместных измерений компонент тензоров электропроводности и коэффициента Холла имеет ряд достоинств. Определение величин, необходимых для расчетов компонент тензора электропроводности и коэффициента Холла, производится при неизменном положении контактов за счет переключений во внешней цепи; измерения напряжений могут производиться компенсационным методом, что исключает влияние переходных контактных сопротивлений; полученные математические выражения позволяют использовать ЭВМ для обработки результатов измерений; методика предполагает изготовление контактов малой площади, которые практически не оказывают влияние на состояние поверхности кристалла, после проведения измерений контакты могут быть легко удалены. Требование к омичности контактов не является жестким, если измерения напряжений производить компенсационным методом.

Совместные измерения электропроводности и коэффициента Холла позволяют выявить такие важные параметры, как концентрацию и подвижность носителей заряда; температурные зависимости данных величин позволяют получать информацию о зонной структуре полупроводника. В соответствии с указанным, в разделе 3.6 нами разработаны оригинальные методики совместных измерений компонент тензора электропроводности и подвижности анизотропных полупроводниковых пластин и пленок.

В главе 2 настоящей работы (раздел 2.2) получено математическое решение задачи о распределении потенциала электрического поля в анизотропных ограниченных образцах в зависимости от граничных условий. На основе этого решения в настоящей работе разработан оригинальный и удобный восьмизондовый метод совместных измерений компонент тензоров удельной электропроводности и коэффициента Холла анизотропных кристаллов и пленок.

Полученное выражение для распределения потенциала в п. 2.3.2 позволяет предложить четырехзондовый метод определения компонент тензора электропроводности. Рассмотрен практически важный случай, когда токовые и измерительные контакты расположены по углам квадрата со стороной L . Квадратный пробник располагается по центру образца, образующие стороны пробника параллельны соответствующим сторонам прямоугольного полупроводникового образца. Для определения компоненты тензора коэффициента Холла, согласно нашей методике, образец помещают в поперечное магнитное поле \mathbf{B} .

Достоинством предложенного способа является возможность проводить совместные измерения компонент тензоров электропроводности и коэффициента Холла при помощи одной зондовой головки при неизменном ее положении на поверхности образца. Возможность измерения без изменения положения зондового пробника является весьма полезным, т.к. при этом механическое повреждение по-

верхности образца зондами становится минимальным. Для применения данной методики требуется достаточно простая установка, что позволяет ее использовать как в промышленных целях, так и в учебных.

Определенные распределения потенциалов в слоистых полупроводниках (п. 1.5.1) позволили предложить методику определения удельной электропроводности данного типа материалов. Согласно предлагаемой методике, необходимо нанести на поверхность исследуемого слоистого полупроводникового образца четыре квадратных контакта малой площади и произвести ряд замеров напряжений между ними при пропускании тока через образец.

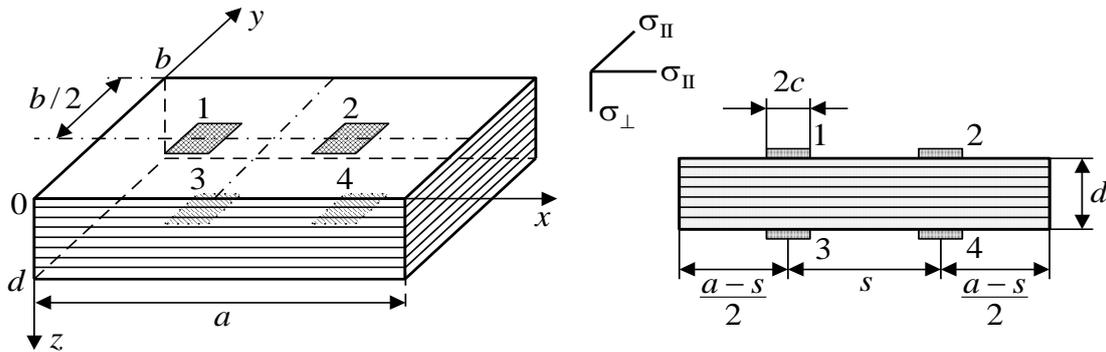


Рис. 6. Схема расположения контактов на исследуемом слоистом полупроводнике при определении электропроводности.

Сущность предлагаемой методики описана в седьмой части главы 3 и заключается в следующем: нанести контакты к образцу согласно рис. 6; пропуская ток через контакты 1, 2, определить напряжение $U_{3,4}$; пропуская ток через контакты 1, 3, определить напряжение $U_{2,4}$; вычислить из эксперимента величину γ ; рассчитать множители L_1, L_2 для полученного γ ; определить компоненты тензора удельной электропроводности:

$$\sigma_{\parallel} = \frac{I_{12}}{U_{3,4}} \cdot \frac{d}{a \cdot b} L_1, \quad \sigma_{\perp} = \frac{I_{13}}{U_{2,4}} \cdot \frac{d}{a \cdot b} L_2. \quad (23)$$

Для экспериментального определения подвижностей вышеуказанных материалов нами проводились измерения эффекта Холла по описанной выше методике в главе 2. Были получены результаты, согласующиеся с известными экспериментальными данными для соответствующих материалов. Достоинством полученных формул является то, что они не зависят от электропроводности материала и являются электродинамическими по своему характеру.

Восьмой раздел главы 3 посвящен исследованию сопротивления контактов к неоднородным полупроводниковым структурам. Получены выражения, позволяющие определять величину сопротивления омических контактов к неоднородно легированным пленкам. Искомое сопротивление контактов определяется как разность между экспериментальным значением и теоретическим. Рассмотрены практически важные случаи, когда электропроводимость σ изменяется с глубиной по одному из следующих законов:

$$\sigma_1(z) = \sigma_0 \exp(-2pz), \quad \sigma_2(z) = \sigma_0 \exp(-2\beta z^2), \quad (24)$$

где σ_0 – поверхностная электропроводимость образца, p и β – постоянные параметры, определяемые технологией получения неоднородного слоя.

Приведенные в части 3.8 работы теоретические расчеты позволяют также

производить измерения поверхностной и средней электропроводимостей неоднородных по глубине полупроводниковых структур.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена исследованию энергетического спектра и моделированию кинетических свойств наноструктур на основе кремниевых материалов и слоистых структур.

В разделе 4.1 выполнен обзор электрофизических свойств приборов и устройств, использующих механически напряженные, слоистые полупроводниковые структуры. Рассмотрены основные методы исследования и расчета электронной структуры полупроводниковых кластеров и наночастиц. Выполненный литературный анализ позволяет сделать вывод, что для кремниевых наночастиц с малым числом атомов полуэмпирический метод квантовой химии NDDO PM3 позволяет с хорошей точностью рассчитывать основные квантово-энергетические свойства структур.

Во второй части главы 4 выполнено моделирование механических деформаций и анализ зонной диаграммы структуры Si/Ge. Построена модель для расчета деформаций в структуре из произвольного числа тонких кристаллических псевдоморфных слоев Si и Ge, исследовано влияние деформации и соотношения толщин композиционных слоев на основные параметры зонной диаграммы. Расчеты основаны на известных экспериментальных и теоретических данных, полученные результаты имеют практическое применение.

Определены величины деформаций в полупроводниковой структуре из N слоев кремния и германия для случая, когда слоистая структура образуется путем сращивания по направлению [001]. Несоответствие постоянных решеток слоев вызывает механические напряжения. Симметрия кристаллических слоев понижается и необходимо вводить два параметра решетки.

В случае кремний-германиевой структуры, представляющей собой систему слоев Si и Ge, выражения, определяющие деформацию в кристаллических пленках кремния, удобно представить в виде:

$$(\varepsilon_{Si})_{11} = (\varepsilon_{Si})_{22} = \frac{a_{Ge} - a_{Si}}{\xi \cdot a_{Ge} + a_{Si}}, \quad (\varepsilon_{Si})_{33} = -\frac{2\nu_{Si}}{1 - \nu_{Si}} \frac{a_{Ge} - a_{Si}}{\xi \cdot a_{Ge} + a_{Si}}, \quad (25)$$

где ν - коэффициент Пуассона, a - постоянная решетки недеформированного кристалла, ξ - безразмерный параметр, определяемый соотношением механических свойств и суммарных толщин (h_{Si} и h_{Ge}) полупроводниковых слоев:

$$\xi = \frac{E_{Si}}{E_{Ge}} \frac{1 - \nu_{Ge}}{1 - \nu_{Si}} \frac{h_{Si}}{h_{Ge}}. \quad (21)$$

В работе представлены зонные диаграммы гетероперехода Si/Ge с учетом деформаций, для псевдоморфных пленок Ge на подложке Si(001) и Si на подложке Ge(001), а также для периода CP с одинаковой толщиной слоев Si и Ge. Пример результатов расчетов зонных диаграмм приведен на рис. 7. Показано, что расположение зон благоприятствует созданию двухмерного дырочного газа в псевдоморфных пленках Ge, выращенных на подложке Si, и двухмерного электронного газа в псевдоморфных пленках Si, выращенных на подложке Ge. Очевидно также, что деформации приводят не только к количественным, но также к качественным изменениям в зонной структуре деформированных полупроводников, что должно привести, в свою очередь, к существенному изменению электронных свойств

напряженного гетероперехода Si/Ge.

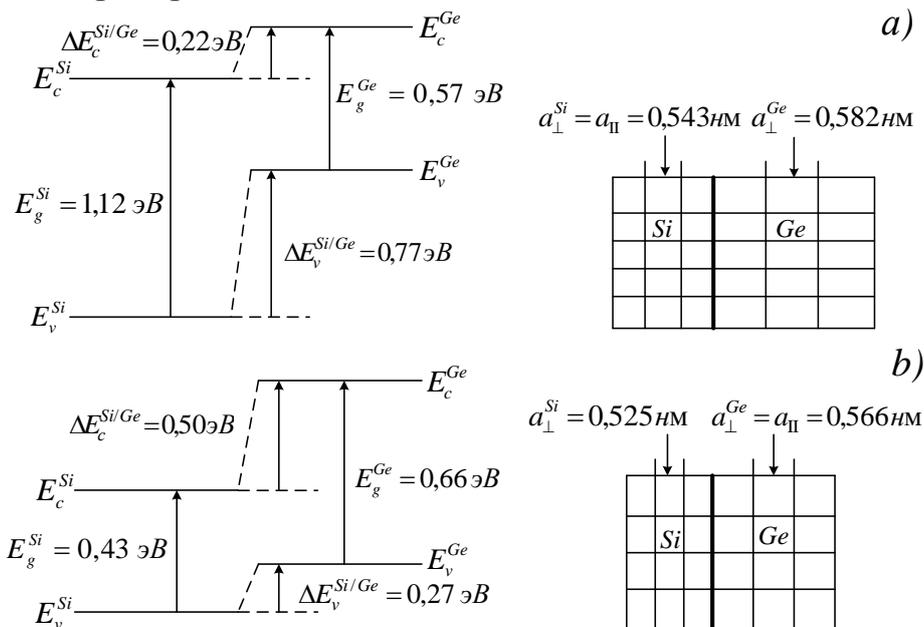


Рис. 7. Рассчитанные зонные диаграммы гетероперехода Si–Ge: а – для псевдоморфных пленок Ge на подложке Si(001); б – Si на подложке Ge(001).

Таким образом, деформации в напряженных гетеропереходах или СР Si/Ge приводят к заметным изменениям в энергетической зонной структуре псевдоморфных слоев Si и Ge. Подбор соотношений толщин кремния и германия позволяет прогнозировать и управлять параметрами зонной диаграммы и, следовательно, электронными свойствами гетеропереходов Si/Ge. Приведенные в работе выражения для деформаций и параметров зонной диаграммы напряженных гетеропереходов могут быть полезны для моделирования физических свойств деформированных полупроводников и электрических характеристик приборов на основе напряженных полупроводниковых гетероструктур.

В третьей части главы 4 выполнен расчет наиболее важных электронных свойств напряженных кремниевых наночастиц на германиевой подложке, учитывающий эффекты взаимодействия граничных атомов кластера с подложкой.

Для учета влияния деформации и взаимодействия с подложкой на электронные свойства структуры были рассмотрены четыре вида кремниевых нанокристаллов:

1. Кремниевый нанокристалл как кластер идеальной решетки недеформированного кремния (с постоянной решетки 0.543 нм). В качестве объекта исследования была выбрана структура из 8 элементарных кристаллических ячеек (2×2×2), при этом атомы, имеющие только одну связь, удалялись. В итоге получили структуру из 51 атома (Si₅₁).

2. Кремниевый нанокристалл как кластер кристаллического кремния, растянутый вдоль плоскости (001) и сжатый в направлении [001]. Величина растяжения в направлениях [100] и [010] выбиралась 4.2% (разница постоянных решеток Si и Ge), величина сжатия в направлении [001] определена как 3.1%.

3. Исходная кремниевая структура вида 2 оптимизировалась методом ММ+, положение нижних атомов фиксировались для учета сцепления с подложкой.

4. В исходной структуре вида 2 эффекты взаимодействия граничных атомов

кремниевого кластера с германиевой подложкой учитывались путем насыщения водородом незаполненных связей этих атомов. Затем геометрия структуры оптимизировалась методом ММ+, при этом положения граничных атомов кремния, насыщенных водородом, оставались фиксированными.

Для указанных выше структур 1 – 4 были определены координаты и эффективные заряды атомов наноструктур, позволяющие судить о степени заселенности орбиталей и распределении электростатического потенциала внутри нанокристалла и вблизи его поверхности. В частности, показано, что при деформации растяжения нанокластера кремния поднимается положение нижнего незаполненного и верхнего заполненного состояния, причем положение верхнего заполненного состояния изменяется более существенно.

Для изучения влияния примеси на свойства кремниевых наночастиц на поверхности германия нами исследовалась электронная структура наночастиц типа XSi_50H_8 (X – примесь). В данных структурах один из внутренних атомов кремния замещался примесным. После этого геометрия структуры оптимизировалась методом ММ+ и определялась электронная структура методом NDDO PM3. Изучено влияние основных примесей, используемых в кремниевых материалах на энергетические параметры наноструктур. В частности, показано, что примесь с нечетным числом валентных электронов уменьшает значение НОМО-LUMO щели по отношению к структуре без примеси примерно в два раза. Положение энергетического уровня, образованного за счет примесного атома, расположено примерно посередине НОМО-LUMO щели кремниевой наночастицы без примеси.

Раздел 4.4 работы посвящен исследованию особенностей распределения электрических полей в каналах транзисторов, обладающих анизотропией проводимости. Теоретически показано, что подвижность вдоль направления растяжения n-Si возрастает примерно в 2 раза (рис. 8). Как показывает проведенное моделирование, электрический ток в растянутом n-Si протекает по более узкому каналу, чем в недеформированном состоянии. Концентрация носителей заряда становится неравномерной по объему кристалла – она максимальна вдоль токовых каналов небольшой ширины, это приводит к уменьшению тока утечки.

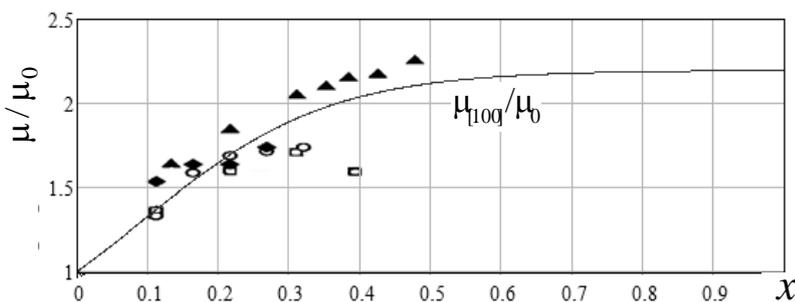


Рис. 8. Рассчитанные изменения относительных подвижностей в растянутом кремнии на подложке $Si_{1-x}Ge_x$ от содержания германия (x). Экспериментальные значения (фигурные точки) соответствуют данным обзора [Lee M.L. // J. Appl. Phys. 2005. V.97. P.011101].

Изменение сопротивления кристалла n-Si, согласно полученным выражениям, зависит от параметров анизотропии нелинейно (рис. 9, 10), следовательно, данную нелинейность необходимо учитывать и при определении изменения электропроводности в результате деформации канала. При этом, изменение величины электрического поля вблизи границ канала, а также изменение его сопротивления можно определить по представленным выражениям для потенциала и сопротивления.

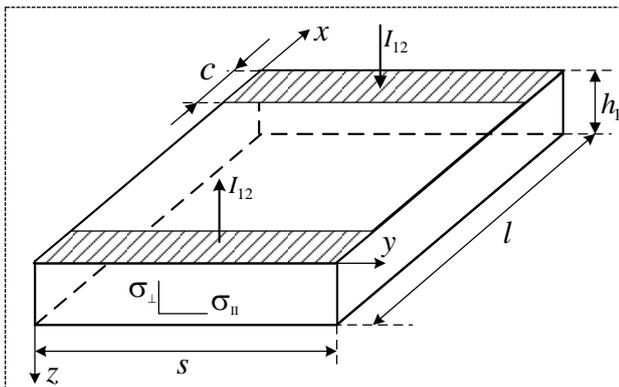


Рис. 9. Схема расположения контактов к напряженному кремниевому каналу.

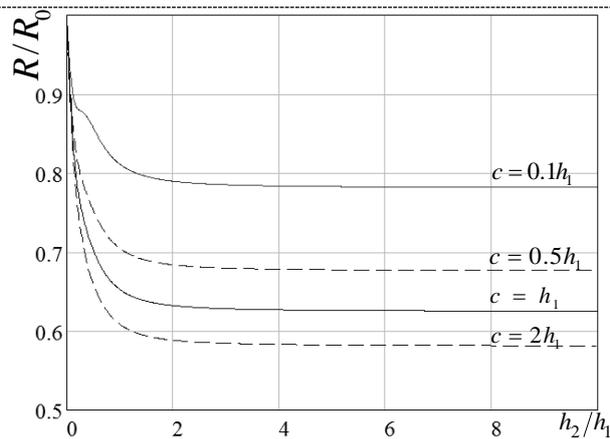


Рис. 10. Зависимость относительного изменения сопротивления открытого канала полевого транзистора на основе напряженного кремния от размера токовых контактов (c), толщин пленки Si (h_1) и подложки Ge (h_2).

Формулы, полученные для распределения электрического поля и для сопротивления анизотропного канала, могут быть использованы не только для кремний-германиевых структур, но и для напряженных каналов на основе каких-либо других материалов, так как данные выражения получены, исходя из общих представлений электродинамики.

Кремниевые нановолокна, синтезированные из газообразного атомарного кремния на поверхности высокоориентированного пиролитического графита, представляют собой новый вид наноразмерного кремния. Образованию волокон предшествуют компактные шарообразные кластеры кремния, обнаруживаемые на поверхности графита при покрытиях, далеких от монослойного. Соответственно, в разделе 4.5.1 рассмотрены сфероидальные кластеры кремния, имеющие максимально плотную упаковку, обладающие повышенной стабильностью. Рассмотрена структура и физические свойства наночастиц Si_{13} и Metal-Si $_{12}$. Расчет геометрии структуры и основных энергетических свойств выполнен нами с помощью квантовохимического метода NDDO PM3.

При рассмотрении характера орбиталей исследуемых наночастиц, заряженных отрицательно, выяснено, что наночастицы $CuSi_{12}^-$ и $ZnSi_{12}^-$ являются проводниками в направлении, перпендикулярном одной из треугольных граней поверхности (наличие замкнутой НОМО орбитали), а наночастицы $FeSi_{12}^-$ и $NiSi_{12}^-$ не являются проводниками в том же направлении (нет замкнутой орбитали). Это можно объяснить тем, что при захвате наночастицей дополнительного электрона он переходит на d -орбиталь железа или никеля. У меди и цинка d -орбитали в нейтральном состоянии уже заполнены, а у железа и никеля для заполнения d -орбиталей не хватает соответственно 4 и 2 электронов.

Исследована энергетическая стабильность кремниевых фуллеренов (Si_{20} , Si_{28} , Si_{36} , Si_{40} , Si_{50} , Si_{60}), определены их основные квантовохимические параметры. Показано, что для повышения устойчивости кремниевых фуллеренов можно помещать внутрь структуры атомы металлов. Гидрирование кремниевых фуллеренов приводит к значительному понижению верхнего заполненного уровня и возрастанию работы выхода. Показано, что управлять энергетическими свойствами нано-

кластера можно путем изменения заряда или изменения внешнего электрического поля.

Весьма перспективным материалом нанoeлектроники считают углеродные нанотрубки, однако их интегрирование в кремниевую электронику представляет определенные трудности. Современная технология позволяет получать нанотрубки не только из углерода, но и из других материалов. Высокой энергетической стабильностью отличаются кремниевые нанотрубки, наполненные металлами. В связи с вышеуказанным, в пятом разделе главы 4 (п. 4.5.2) построена модель расчета проводимости кремниевых нанотрубок, наполненных атомами металлов. Показано, что глубина потенциальной ямы для электронов прямо пропорциональна радиусу нанотрубки. Получены аналитические выражения для плотности электронных состояний, проводимости и энергии Ферми в наполненных металлами хиральных кремниевых и углеродных нанотрубках. При теоретических расчетах впервые учтены анизотропия эффективной массы, различная хиральность; рассмотрены случаи квадратной и гексагональной ячеек, образующих поверхностную структуру нанотрубок.

Результаты расчетов свойств кремниевых наноструктур решают важную задачу современной физики полупроводников - позволяют прогнозировать свойства приборов микро- и нанoeлектроники.

Раздел 4.6 посвящен исследованию туннельно-резонансных структур. При практическом применении такого рода структур одной из основных характеристик являются контрастность ВАХ. Для создания нового поколения резонансно-туннельных диодов (РТД) и гетеролазеров с отдельным электронным и оптическим ограничением применяются структуры, моделируемые прямоугольными квантовыми ямами, в центре которых имеется дополнительный провал (рис. 11). Цель данной части работы – оценка смещений уровней энергетического спектра в прямоугольной квантовой яме, в которой имеется дополнительный провал, расположенный несимметрично относительно стенок ямы.

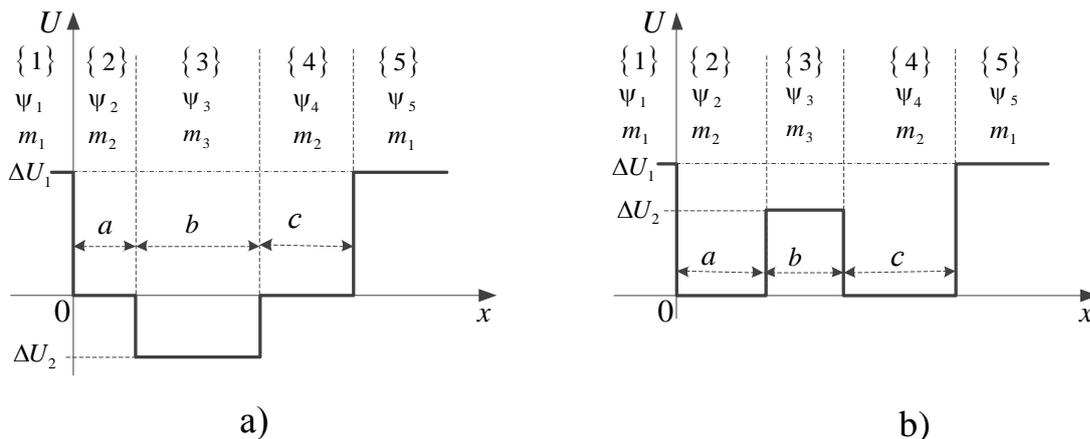


Рис. 11. Схема дна зоны проводимости в гетероструктуре, образующей квантовую яму со сложным профилем. Здесь m_i – эффективная масса носителей заряда в каждом из слоев; ΔU_1 и ΔU_2 – положения дна зон проводимости, a, b, c – толщины нанопленок, образующих среднюю область туннельно-резонансной структуры.

Благодаря провалу уровень основного состояния опускается по сравнению со случаем простой ямы, а уровень возбужденного состояния смещается вверх, что обусловлено меньшей величиной эффективной массы электрона в области

провала. Расстояние между основным и возбужденным уровнями увеличивается, и этот интервал энергий преобразуется в соответствующий интервал напряжений смещения на диоде. Чем больше интервал смещений, тем глубже упадет ток в минимуме ВАХ.

Таким образом, выполненные нами квантовомеханические расчеты показывают, что если провал смещен влево или вправо, то происходит уменьшение разности между уровнями и снижение контрастности ВАХ. Показано, что для бесконечно глубокой ямы наиболее сильно смещается уровень первого возбужденного состояния, напротив, в модели с ямой конечной глубины наиболее существенно смещается за счет дополнительного провала уровень основного состояния. Определены также области локализации электронов в туннельно-резонансных структурах в основном и первом возбужденном состояниях.

Выражения, определяющие энергетический спектр в квантовых ямах сложной формы могут быть полезны при проектировании и моделировании структур, используемых в устройствах микро- и нанoeлектроники.

В разделе «**Заключение**» приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1.** Показано, что решение ряда практически важных краевых задач электродинамики с граничными условиями в виде наклонной производной возможно с помощью комплексных рядов Фурье. Получены выражения в виде рядов аналитических функций, позволяющие выполнять расчет распределений потенциала в анизотропных полупроводниках при зондовых измерениях.
- 2.** Путем теоретического анализа полученных распределений потенциала и экспериментальных исследований показано наличие в анизотропных полупроводниках поперечного напряжения анизотропии, вихревой составляющей плотности тока и концентрации плотности тока. Указанные явления, обусловленные сложным характером распределения электрического потенциала и плотности тока, объясняются с помощью модели вихревых токов анизотропии.
- 3.** На основе разработанного оригинального метода решения краевых задач с граничными условиями в виде наклонной производной, впервые получены выражения для электрического потенциала в анизотропном полупроводнике с монополярной проводимостью, помещенном в поперечное магнитное поле, с точностью до членов, содержащих квадрат индукции внешнего магнитного поля.
- 4.** Теоретически показано, что в анизотропных полупроводниках при измерениях гальваномагнитных эффектов существенное влияние оказывает поперечное напряжение анизотропии и концентрация тока проводимости. Показано, что при холловских измерениях с высокоомными токовыми контактами наличие слабого магнитного поля не изменяет распределения электрического тока. Следовательно, метод Ван-дер-Пау измерения э.д.с. Холла применим к полупроводникам с тензорным характером проводимости.
- 5.** На основе результатов расчета электрических полей разработан ряд новых методик измерения кинетических параметров анизотропных полупроводниковых материалов: четырехзондовые и восьмизондовые методы совместных измерений

электропроводности и подвижности носителей заряда. Предложена оригинальная методика измерения сопротивления контактов и контроля проводимости пленок с экспоненциальным и нормальным распределением примесей по глубине.

6. Теоретически обоснованы и экспериментально испытаны новые методы определения сопротивления контактов к анизотропным и изотропным кристаллам и пленкам. Разработана оригинальная технология нанесения никелевых контактов на поверхность полупроводникового кремния путем электроосаждения и исследований резистивных свойств получаемых контактов металл-полупроводник.

7. Определены зонные диаграммы гетероперехода Si-Ge с совмещенной решеткой. Механическое напряжение кремниевых каналов транзисторов приводит к протеканию тока по более узкому каналу, чем в случае ненапряженного канала, следовательно, в напряженных каналах кремниевых МОП уменьшается ток утечки и снижается крутизна сток-затворной характеристики транзистора. Показано, что в кластерах кремния на германиевой подложке положительный заряд распределяется на поверхности кластера, причем влияние подложки Ge приводит к переносу положительного заряда от кластера кремния к подложке.

8. Построена одноэлектронная модель туннельно-резонансных структур, в рамках которой показано, что контрастность ВАХ резонансно-туннельных диодов возрастает при наличии потенциального провала для электронов, расположенном посредине структуры, при том в области дополнительного энергетического провала эффективная масса должна быть значительно меньше, чем в остальной области. Определена область локализации электрона в структуре резонансно-туннельного диода в зависимости от потенциального рельефа квантовой ямы, показано уменьшение электронной плотности в области дополнительного потенциального провала.

9. Выполнены квантовохимические расчеты электронных свойств кремниевых нанокластеров. Впервые показано, что атомы переходных металлов, инкапсулированные в кремниевые фуллерены, повышают энергетическую стабильность наночастиц. Для наполненных металлами хиральных кремниевых нанотрубок показано, что с возрастанием анизотропии эффективной массы электронов проводимости (отношение продольной эффективной массы к поперечной) плотность состояний и квазиимпульс Ферми свободных электронов сдвигаются в область больших значений.

Основные публикации автора по теме диссертационного исследования:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

- [1] Филиппов, В.В. Измерение сопротивления контактов металл-полупроводник и контроль удельного сопротивления полупроводниковых пленок / В.В. Филиппов, П.В. Фролов, Н.Н. Поляков // Известия вузов. Физика. – 2003. – Т. 46, № 7. – С. 80-87.
- [2] Филиппов, В.В. Особенности гальваномагнитных явлений в пленках анизотропных полупроводников / В.В. Филиппов, Н.Н. Поляков // Известия вузов. Электроника. – 2004. – № 2. – С. 9-16.
- [3] Поляков, Н.Н. Измерение электропроводности анизотропных полупроводниковых пластин и пленок / Н.Н. Поляков, А.В. Карлов, В.В. Филиппов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 3. – С. 26-31.

- [4] Поляков, Н.Н. Капельный метод электрохимического осаждения контактов металл-полупроводник и исследование его свойств / Н.Н. Поляков, С.В. Мицук, В.В. Филиппов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 2. – С. 30-34.
- [5] Филиппов, В.В. Восьмизондовый метод совместных измерений электропроводимости и коэффициента Холла анизотропных полупроводниковых пленок / В.В. Филиппов, Н.Н. Поляков, С.В. Мицук // Известия вузов. Электроника. – 2006. – № 4. – С. 81-87.
- [6] Филиппов, В.В. Моделирование электрического поля в напряженных полупроводниковых каналах / В.В. Филиппов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия «Физико-математическое моделирование». – 2006. – Т. 2, № 8. – С. 124-126.
- [7] Поляков, Н.Н. Измерение сопротивления контактов металл-полупроводник путем определения сопротивления растекания / Н.Н. Поляков, С.В. Мицук, В.В. Филиппов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 4. – С. 35-39.
- [8] Филиппов, В.В. Методика определения удельной электропроводности и подвижности носителей заряда в слоистых полупроводниковых материалах / В.В. Филиппов // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – Т. 50, № 4 – С. 136-139.
- [9] Филиппов, В.В. Квантовохимическое моделирование структуры напряженных нанокристаллов кремния / В.В. Филиппов, С.И. Курганский, Н.С. Переславцева // Журнал структурной химии. – 2007. – Т. 48, № 5 – С. 1016-1019.
- [10] Филиппов, В.В. Методика определения компонент тензора удельной электропроводности анизотропных полупроводниковых пленок / В.В. Филиппов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – Т. 51, № 4 – С. 150-153.
- [11] Филиппов, В.В. Квантовохимическое моделирование структуры напряженных нанокристаллов кремния на германиевой подложке / В.В. Филиппов, Н.С. Переславцева, С.И. Курганский // Известия РАН. Серия физическая – 2008. – Т. 72, № 9. – С. 1314-1316.
- [12] Филиппов, В.В. Распределение потенциала при зондовых измерениях в анизотропных полупроводниковых пленках / В.В. Филиппов // Известия вузов. Физика. – 2009. – Т. 54, № 1. – С. 51-57.
- [13] Филиппов, В.В. Моделирование электрических свойств каналов кремниевых МОП транзисторов на деформирующей подложке / В.В. Филиппов, Б.К. Петров, Ю.М. Мяснянкин // Известия вузов. Электроника. – 2009. – № 6 – С. 21-27.
- [14] Филиппов, В.В. Моделирование электронных свойств кремниевых наночастиц с плотной атомной упаковкой / В.В. Филиппов, А.Н. Власов // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 1 – С. 70-75.
- [15] Филиппов, В.В. Моделирование свойств каналов кремниевых МОП транзисторов на деформирующей подложке германия / В.В. Филиппов, Б.К. Петров // Микроэлектроника. – 2010. – Т. 39, № 4 – С. 265-273.
- [16] Филиппов, В.В. Моделирование деформаций и зонной диаграммы гетероструктуры кремний-германий / В.В. Филиппов, А.Н. Власов, Е.Н. Бормونت

// Конденсированные среды и межфазные границы. – 2010. – Т. 12, №3. – С. 282-287.

- [17] Филиппов, В.В. Моделирование энергетического спектра носителей заряда в туннельно-резонансных структурах / В.В. Филиппов, А.А. Заворотный, Е.Н. Бормонтов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – Т. 13, №3. – С. 363-368.
- [18] Власов, А.Н. Квантово-энергетические и кинетические свойства материалов кремниевой наноэлектроники на основе кластеров Si_2-Si_{10} / А.Н. Власов, В.В. Филиппов // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал РАН). – 2011. – № 8. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug11/6/text.html>.
- [19] Филиппов, В.В. Распределения потенциала в анизотропных полупроводниковых кристаллах и пленках при измерениях электропроводности и коэффициента Холла / В.В. Филиппов, Н.Н. Поляков // Вести вузов Черноземья. – 2011. – № 2. – С. 6-10.
- [20] Филиппов, В.В. Квантовохимическое моделирование структуры кремниевых фуллеренов / В.В. Филиппов, А.Н. Власов // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал РАН). – 2011. – № 11. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov11/15/text.html>.
- [21] Филиппов, В.В. Моделирование электрических полей при зондовых измерениях в анизотропных полупроводниковых пленках / В.В. Филиппов, А.Н. Власов, Е.Н. Бормонтов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 499-503.
- [22] Филиппов, В.В. Моделирование атомной структуры и электронных свойств кремниевых нанотрубок / В.В. Филиппов, Е.Н. Бормонтов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия «Физика, математика». – 2011. – №2. – С. 52-57.
- [23] Филиппов, В.В. Моделирование распределений потенциала при зондовых измерениях в анизотропных полупроводниках / В.В. Филиппов // Вести вузов Черноземья. – 2011. - № 3. – С. 36-40.
- [24] Филиппов, В.В. Зондовые измерения распределения потенциала в анизотропных полупроводниковых кристаллах и пленках / В.В. Филиппов, А.Н. Власов // Известия вузов. Электроника. – 2012. – № 1. – С. 48-53.
- [25] Филиппов, В.В. Четырехзондовый метод совместных измерений компонент тензора удельной электропроводности и коэффициента Холла анизотропных полупроводниковых пленок / В.В. Филиппов // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – Т. 55, № 1. – С. 112-117.
- [26] Филиппов, В.В. Методика определения электропроводности неоднородных по глубине полупроводниковых пленок / В.В. Филиппов, С.Е. Лузянин, Е.Н. Бормонтов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2012. – Т. 14, №3. – С. 340-343.

Монографии и учебные пособия

- [27] Филиппов, В.В. Методы измерения и контроля коэффициентов электронного переноса анизотропных полупроводников (монография) / В.В. Филиппов, Н.Н. Поляков. – Липецк: ЛГПУ. – 2011. – 110 с.
- [28] Филиппов, В.В. Квантовохимическое моделирование и проектирование полу-

проводниковых наноструктур (учебное пособие для студентов вузов) / В.В. Филиппов, А.Н. Власов. – Липецк: ЛГПУ. – 2011. – 112 с.

- [29] Филиппов, В.В. Энергетический спектр носителей заряда в структурах наноэлектроники (учебное пособие для студентов вузов) / В.В. Филиппов, А.А. Заворотный, С.В. Мицук. – Липецк: ЛГПУ. – 2012. – 72 с.

Прочие журналы, материалы конференций, статьи в сборниках

- [30] Поляков, Н.Н. Особенности явлений электронного переноса в анизотропных монокристаллах и пленках / Н.Н. Поляков, В.В. Филиппов // Исследовано в России (электронный журнал). – 2003. – 046. – С. 539-548. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/046.pdf>.
- [31] Филиппов, В.В. Измерение удельного сопротивления тонких пленок и контактов металл-полупроводник / В.В. Филиппов, Н.Н. Поляков. // Труды 4-й Международной конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современной науки». Естественные науки. Части 12 - 16 Секции: электротехника, приборостроение, электроника. – Самара: СГТУ. – 2003. – С. 67-69.
- [32] Филиппов, В.В. Компьютерное моделирование явлений электронного переноса в ограниченных анизотропных полупроводниках / В.В. Филиппов, С.В. Мицук, Н.Н. Поляков // Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах: Материалы междунар. семинара. – Воронеж: ВГТУ, 2004. – С. 9-10.
- [33] Филиппов, В.В. Моделирование сопротивления растекания контакта металл-анизотропный полупроводник / В.В. Филиппов, С.В. Мицук, Н.Н. Поляков // Физико-математическое моделирование систем: Материалы междунар. семинара. – Воронеж: ВГТУ, 2004. – С. 47-51.
- [34] Филиппов, В.В. Моделирование электрического поля в неоднородных полупроводниковых структурах / В.В. Филиппов, С.В. Мицук // Физико-математическое моделирование систем: Материалы II Междунар. семинара. Ч. 1: Моделирование физических процессов в конденсированных средах и межфазных границах. – Воронеж: ВГТУ, 2005. – С. 81-86.
- [35] Мицук, С.В. Моделирование электрического поля в полупроводниковых дисках / С.В. Мицук, В.В. Филиппов // Материалы и технологии XXI век: Сборник статей IV Международной научно-технической конференции. – Пенза: НОУ «Приволжский дом знаний», 2006. – С. 248-250.
- [36] Филиппов, В.В. Особенности явлений электронного переноса в механически напряженных полупроводниковых каналах МДП транзисторов / В.В. Филиппов, Б.К. Петров // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах – 2005: Материалы докл. науч.-техн. семинара. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, МЭИ, 2006. – С. 139-144.
- [37] Поляков, Н.Н. Моделирование явлений электронного переноса в анизотропных полупроводниках / Н.Н. Поляков, В.В. Филиппов // Вестник Липецкого государственного педагогического университета. Серия «Математика, информатика, физика». – 2006. – Т. 1, № 1. – С. 69-77.
- [38] Поляков, Н.Н. Эффект Холла в анизотропных полупроводниках / Н.Н. Поляков, В.В. Филиппов // Вестник Липецкого государственного педагогического университета. Серия «Математика, информатика, физика». – 2006. – Т. 1, № 1. –

С. 78-87.

- [39] Филиппов, В.В. Моделирование вихревых токов в анизотропных полупроводниках / В.В. Филиппов, С.В. Мицук, Н.Н. Поляков // Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах: Материалы V Междунар. семинара. – Воронеж: ВГТУ, 2007. – С. 139-144.
- [40] Филиппов, В.В. Моделирование гальваномагнитных эффектов в полупроводниковых дисках / В.В. Филиппов, С.В. Мицук // Физико-математическое моделирование систем: Материалы IV Междунар. семинара. – Воронеж: ВГТУ, 2007. – Ч. 2. – С. 12-15.
- [41] Филиппов, В.В. Моделирование распределения потенциала при зондовых измерениях электропроводимости анизотропных пластин / В.В. Филиппов // Физико-математическое моделирование систем: Материалы IV Междунар. семинара. – Воронеж: ВГТУ, 2007. – Ч. 2. – С. 76-81.
- [42] Филиппов, В.В. Моделирование вихревых токов в анизотропных полупроводниках / В.В. Филиппов, С.В. Мицук, Н.Н. Поляков // Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия «Физико-математическое моделирование». – 2007. – Т. 3, № 8. – С. 155-158.
- [43] Филиппов, В.В. Квантовохимическое моделирование структуры напряженных нанокристаллов кремния на германиевой подложке / В.В. Филиппов, Н.С. Переславцева, С.И. Курганский // Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия «Физико-математическое моделирование» – 2007. – Т. 3, № 8. – С. 159-161.
- [44] Филиппов, В.В. Моделирование электронной структуры кремниевых напряженных наночастиц / В.В. Филиппов // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии (Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies). – 2008. – Т. 6, № 3. – С. 1001-1011.
- [45] Филиппов, В.В. Исследование транспортных свойств кремниевых кластеров / В.В. Филиппов // Материалы Всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях». – М.: МИФИ, 2008. – С. 245-246.
- [46] Филиппов, В.В. Моделирование электрических полей в слоистых анизотропных полупроводниковых структурах / В.В. Филиппов // Физико-математическое моделирование систем: Материалы V Междунар. семинара. – Воронеж: ВГТУ, 2008. – Ч. 1. – С. 143-146.
- [47] Филиппов, В.В. Методика определения электропроводности и подвижности носителей заряда в слоистых полупроводниковых материалах / В.В. Филиппов // Физико-математическое моделирование систем: Материалы VI Междунар. семинара. – Воронеж: ВГТУ, 2009. – Ч. 1. – С. 52-57.
- [48] Филиппов, В.В. Распределение электрического потенциала при измерениях электропроводимости анизотропных пластин / В.В. Филиппов // Материалы Всероссийской конференции «Неравновесные процессы в природе». – Елец: ЕГУ, 2010. – С. 68-72.

- [49] Филиппов, В.В. Моделирование электрических полей в полупроводниковых пленках при зондовых измерениях / В.В. Филиппов, А.Н. Власов // Физико-математическое моделирование систем: Материалы VII Междунар. семинара. – Воронеж: ВГТУ, 2010. – Ч. 1. – С. 210-212.
- [50] Лузянин, С.Е. Методика определения электропроводности неоднородных по глубине полупроводниковых пленок / С.Е. Лузянин, Н.Н. Поляков, В.В. Филиппов // Материалы XV Междунар. конференции «Радиолокация, навигация, связь» – Воронеж: ВГУ, 2011. – Т. 1. – С. 818-823.
- [51] Филиппов, В.В. Моделирование энергетического спектра и локализации носителей заряда в туннельно-резонансных наноструктурах / В.В. Филиппов // Синтез, свойства и применение графенов и слоистых наносистем: Материалы Междунар. семинара. – Астрахань: АГУ, 2011. - С. 37-41.
- [52] Филиппов, В.В. Моделирование энергетического спектра носителей заряда наноэлектронных структур с туннельно связанными квантовыми ямами / В.В. Филиппов, А.А. Заворотный // Физико-математическое моделирование систем: Материалы VIII Междунар. семинара. – Воронеж: ВГТУ, 2011. – Ч. 1. – С. 71-78.

В.В. Филиппов

**Явления электронного переноса в анизотропных
и низкоразмерных полупроводниковых структурах**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Липецкий государственный педагогический университет»

398020, г. Липецк, ул. Ленина, 42.

Отпечатано в РИЦ ФГБОУ ВПО «ЛГПУ». Подписано в печать 20.12.2012г. Заказ № 1000.

Формат 60x84 1/16. 2 п.л. Тир. 150 экз.