

На правах рукописи



ЗАВОРОТНИЙ Анатолий Анатольевич

**ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ
КИНЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ АНИЗОТРОПНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР**

Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Курск – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент **Филиппов Владимир Владимирович**

Официальные оппоненты: **Немов Сергей Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, кафедра «Технология и исследование материалов», профессор

Калинин Юрий Егорович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Воронежский государственный технический университет, кафедра физики твердого тела,
заведующий кафедрой

Ведущая организация: ФГАО ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Защита состоится «26» апреля 2018 года в 15³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.04 при Юго-Западном государственном университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке Юго-Западного государственного университета, по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, и на сайте <https://www.swsu.ru/ds/diss-swsu/>.

Автореферат разослан « » марта 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Рослякова
Людмила Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Бурное развитие современной полупроводниковой электроники невозможно без использования новых материалов и без совершенствования качеств уже существующих. На сегодняшний момент полупроводниковые материалы на основе кремния, германия и ряда других элементов подробно исследованы, выявлены все важные практические особенности. Однако дальнейшее их применение затруднено из-за ряда ограничивающих факторов, например, из-за довольно низкой чувствительности к внешним воздействиям таким, как электрическое и магнитное поля, нагревания, и т.д. Одним из перспективных направлений решения сложившейся ситуации является использование полупроводниковых кристаллов, обладающий тензорным характером своих параметров, т.е. являющихся анизотропными. Анизотропия может возникать в таких материалах как в процессе роста кристаллов (например, группы A_2B_5 и A_2B_6), так под внешними воздействиями: неоднородно приложенном внешнем давлении, облучении и др. Среди физических кинетических коэффициентов, обладающих тензорным характером в анизотропных полупроводниках одними из главных являются удельная электропроводность и коэффициент Холла, т.к. именно они и их температурные зависимости дают наибольшие сведения об исследуемом полупроводниковом кристалле. В свою очередь компоненты тензора электропроводности не являются теми величинами, которые определяются непосредственными методами измерений. Поэтому на современном этапе сохраняется необходимость разработки таких методов исследований анизотропных материалов, которые давали бы наименьшую погрешность измерений, были бы достаточно простыми, доступными и экспрессными.

В современных литературных источниках не снижается количество публикаций, посвященных совершенствованию и разработке новых методов экспериментальных определений различных кинетических параметров анизотропных полупроводниковых кристаллов. Однако в большинстве случаев предлагаемые способы требуют сложного оборудования либо содержат в себе необходимость расчета достаточно трудоемких вычислений. Современная метрика полупроводников не обходится без, ставших классическими, методов Ван дер Пау, двух- и четырехзондовых, однако, согласно литературным данным, их распространение на измерения кинетических коэффициентов, имеющих вид тензора, дает огромную погрешность. Поэтому остается актуальной модернизация существующих и создание новых методик измерений электрокинетических характеристик кристаллов и пленок полупроводников.

Миниатюризация полупроводниковых структур приводит не только к квантово-механическим эффектам, но и к возникновению анизотропии кинетических параметров наноматериалов. К наиболее перспективным анизотропным наноструктурам относятся кремниевые нанотрубки (КНТ). Различные исследовательские группы мира только начинают экспериментально получать КНТ единичными образцами. Соответственно, разработка теоретических моделей таких материалов, позволяющих прогнозировать особенности переноса носителей заряда в них, является одним из актуальных перспективных направлений изучения физики полупроводниковых наноструктур.

Таким образом, поиски и разработки методов исследования электрофизических свойств анизотропных полупроводников остаются одной из актуальных задач физики полупроводников и наноэлектроники.

Существующий уровень разработанности темы исследования, свидетельствует о том, что в настоящий момент продолжают поиски способов модернизации существующих и разработки новых методов измерения основных электрофизических параметров полупроводниковых кристаллов функциональной электроники и наноэлектроники, учитывающих анизотропию электрических свойств.

Целью диссертационной работы является выявление особенностей электронного переноса в ограниченных анизотропных полупроводниках зондовыми и контактными методами измерений кинетических коэффициентов.

Объект исследования: полупроводниковые кристаллы с ярко выраженной анизотропией электрофизических свойств, обусловленной естественными причинами роста объемных кристаллов (в частности кристаллы A_2B_5).

Предмет исследования: методы измерения электрокинетических коэффициентов таких, как удельная электропроводность и коэффициент Холла анизотропных пластин и пленок.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие научные задачи:

1. Выполнить анализ распределения электрических полей в ограниченных анизотропных полупроводниках при контактных методах измерений тензоров электропроводности и коэффициента Холла.

2. Разработать методики измерений удельной электропроводности анизотропных полупроводников на основе известных зондовых методов и контактных методов Ван дер Пау.

3. Разработать зондовые методики измерений коэффициента Холла анизотропных полупроводников.

4. Выполнить анализ разработанных методик с учетом локальности расположения зондов и взаимовлияния токовых контактов.

5. Найти выражения энергетического спектра, квазиимпульса Ферми и плотности квантовых состояний носителей заряда и провести их анализ для кремниевых нанотрубок, легированных атомами металлов.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленной цели и решения указанных задач были применены: 4-х зондовые методы измерений электропроводности и коэффициента Холла полупроводников; контактные компенсационные методы Ван дер Пау, 2-х зондовые методы, методика измерения сопротивления растекания; методы разделения переменных и теории возмущения (для решения краевых задач электродинамики).

Научная новизна работы

1. Выявлено, что эффект концентрирования плотности тока в анизотропных полупроводниках приводит к нелинейной зависимости измеряемого тока от компонент тензора удельной электропроводности.

2. Теоретически и экспериментально доказана возможность расчета величины нелинейного сопротивления растекания анизотропного полупроводника, учитывающего влияния размеров токовых контактов на компоненты тензора удельной электропроводности.

3. Получено решение краевой электродинамической задачи с граничными условиями в виде наклонной производной путем совместного использования методов возмущения и

разделения переменных применительно к распределению холловского потенциала в анизотропных полупроводниках.

4. Теоретически показано, что в кремниевых нанотрубках допированных атомами металлов квазиимпульс Ферми и плотность квантовых состояний возрастают с увеличением анизотропии эффективной массы носителей заряда $m_{\parallel} / m_{\perp}$.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты теоретических исследований кинетических явлений электронного переноса в ограниченных анизотропных образцах, позволившие установить и объяснить, что концентрирование плотности тока в таких структурах вдоль узких каналов на линии контактов приводит к нелинейной зависимости измеряемого тока от компонент тензора электропроводности.

2. Теоретические выражения в виде рядов аналитических функций, позволившие учесть и количественно определить неоднородность распределения электрического поля в анизотропных полупроводниках при зондовых измерениях таких кинетических коэффициентов, как удельная электропроводность и коэффициент Холла.

3. Квантовая модель кремниевых нанотрубок, заполненных атомами металлов, в рамках которой показана зависимость энергии расщепления уровней и квазиимпульса Ферми от анизотропии эффективной массы электронов, а также возрастание плотности квантовых состояний носителей заряда с увеличением параметра анизотропии.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что в ней представлены выражения для распределений электрических полей в анизотропных полупроводниковых кристаллах позволяют определять кинетические коэффициенты полупроводниковых пластин и пленок. Полученные и апробированные в работе выражения для сопротивления растекания контактов металл-анизотропный полупроводник важны при анализе качества и надежности изготовленных токовых электродов, а также для оптимального выбора их расположения на поверхности полупроводникового кристалла. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена применимость разработанных новых методик измерения удельной электропроводности и коэффициента Холла полупроводниковых структур функциональной электроники, а также для контроля однородности в распределении электрофизических параметров по объему анизотропного кристалла. Моделирование энергетического спектра и плотности квантовых состояний электронов в кремниевой нанотрубке (КНТ), легированной атомами металлов, важно при проектировании и прогнозировании электрофизических свойств как в процессе изготовления КНТ, так и последующего их применения в нанoeлектронных устройствах.

Достоверность результатов, изложенных в диссертационной работе обеспечена: выбором известных методов математической физики для решения соответствующих электродинамических краевых задач, подбором надежного и сертифицированного оборудования для проведения экспериментальных работ, сопоставлением с результатами других авторов. Большая часть положений работы не только теоретически обоснована, но и экспериментально подтверждена. Все использованные в диссертации алгоритмы реализованы автором в виде прикладных программ в средах MathCad, при написании которых использовались стандартные подпрограммы.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на международных, всероссийских и региональных конференциях и семинарах, в том числе

на: международной конференции молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов» (Россия, г. Москва, МГУ 2012, 2013 гг.); IX, X, XII, XIII, XIV, XVIII международном семинаре «Физико-математическое моделирование систем» (Россия, г. Воронеж, ВГУ, 2012, 2013, 2014, 2015, 2017 гг.); международной зимней школе по физике полупроводников (Россия, г. Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2014 г.); 19-ой и 20-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика» (Россия, г. Москва, г. Зеленоград, МИЭТ, 2012, 2013 гг.); XI Всероссийская конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Россия, г. Саратов, ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова, 2016, 2017 гг.); областной научной конференции «Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания» (Россия, г. Липецк, ЛГПУ, 2012, 2013, 2014, 2016 гг.).

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы включены в учебные курсы по дисциплинам «Физика полупроводниковых приборов», «Физические основы наноэлектроники», «Общая и экспериментальная физика» в Липецком государственном педагогическом университете имени П.П. Семенова-Тян-Шанского и могут быть рекомендованы к внедрению в профильные дисциплины, изучаемые по направлениям подготовки высшего образования, связанными с необходимостью изучения современных материалов электронной техники («Радиофизика», «Радиотехника», «Конструирование и технология электронных схем», «Электроника и наноэлектроника» и др.).

Материалы работы использовались при проведении следующих НИР: Госзадание по НИР 2.3833.2011 «Явления электронного переноса в анизотропных и низкоразмерных полупроводниковых структурах» (2011-2013 гг.), НИР № 2271 «Особенности электронного переноса в ограниченных анизотропных и неоднородных полупроводниках» в базовой части Государственного задания №2014/351 (2014, 2015 гг.).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 35 работ, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК или включенных в международную базу научного цитирования Scopus.

Личный вклад автора. Направление исследований, постановка большей части задач, разработка методов исследования определялись совместно с научным руководителем, некоторые задачи были поставлены и реализованы автором лично. Основные теоретические и экспериментальные результаты, а также компьютерные модели, включенные в диссертацию, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор внес значительный вклад в написание статей, раскрывающих содержание работы. Анализ и интерпретация полученных результатов, выводы и научные положения, выносимые на защиту сформулированы автором лично.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.10 «Физика полупроводников» по следующим пунктам паспорта специальности: п. 6 «Электронный транспорт в полупроводниках и композиционных полупроводниковых структурах»; п. 13 «Транспортные и оптические явления в структурах пониженной размерности»; п. 17 «Моделирование свойств и физических явлений в полупроводниках и структурах, технологических процессов и полупроводниковых приборов»; п. 19 «Разработка методов исследования полупроводников и композитных полупроводниковых структур».

Научные гранты, имеющие отношение к выполнению данной работы: грант Министерства образования и науки РФ в рамках Госзадания «Явления электронного

переноса в анизотропных и низкоразмерных полупроводниковых структурах» (2012-2016 гг.); научная стажировка в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в рамках проекта фонда М. Прохорова «Академическая мобильность» (2014 г.); региональная научная премия имени С.Л. Коцаря Администрации Липецкой области за работу «Разработка неразрушающих методов контроля физических свойств материалов функциональной электроники» (2015 г.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 182 наименований. Общий объем диссертации составляет 169 страниц, включая 67 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

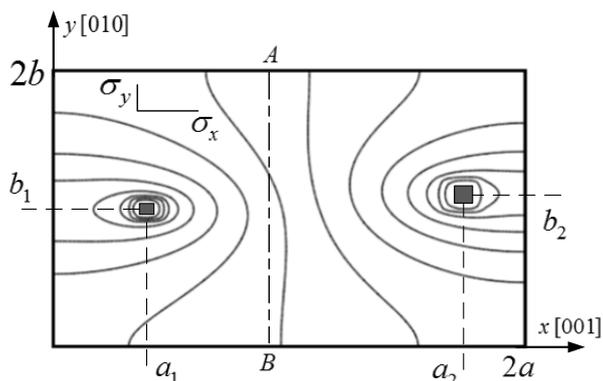
Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы, задачи, методы исследования, определена научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика работы.

В **первой главе** представлен аналитический обзор литературы по теме диссертации. Приведены современные сведения об особенностях явлений переноса в анизотропных полупроводниках, об электрофизических свойствах контактов металл-полупроводник. Значительное внимание уделено основным существующим методам измерения таких кинетических коэффициентов, как удельная электропроводность и коэффициент Холла в полупроводниковых структурах как изотропных, так и анизотропных (относительно электропроводности). Представлено описание исследований влияния неоднородных включений на электрофизические параметры в материалах твердотельной электроники и наноэлектроники.

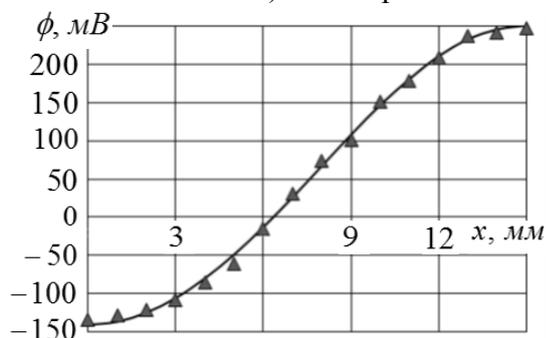
Во **второй главе** описаны физико-математические модели зондовых измерений кинетических коэффициентов и методы, посредством которых решены краевые задачи электродинамики по распределению потенциала электрического поля в области полупроводниковых кристаллов, обладающих анизотропией электрофизических свойств. Представлены решения задач в случаях, когда токовые контакты расположены на периметре образцов и имеют толщину исследуемого кристалла, т.е. распределение потенциала считается двумерным. Рассмотрена практическая ситуация, когда электроды расположены на плоской поверхности полупроводника и имеют значительно меньшие размеры по сравнению с размерами самого образца, получена трехмерная модель распределения потенциала. Значительное внимание уделено расчету потенциала электрического поля в анизотропном полупроводнике, находящемся во внешнем относительно слабом магнитном поле, т.е. в условиях при которых зависимость э.д.с. Холла от магнитного поля является линейной.

Для каждого полученного выражения потенциала электрического поля проведена экспериментальная проверка на изотропных (Si, Ge, GaAs), и анизотропных (CdAs₂, CdSb, ZnAs₂) полупроводниковых образцах и выполнен статистический анализ по согласованию с теоретическими расчетами по критерию Пирсона. На рис. 1 представлены схема расположения токовых контактов (рис. 1, а) и примеры сравнений теоретически рассчитанной кривой распределения потенциала с экспериментально полученными значениями без внешнего магнитного поля (рис. 1, б) и при включении дополнительного перпендикулярно направленного магнитного поля (рис. 1, в) для анизотропного относительно удельной электропроводности полупроводникового кристалла CdSb. На

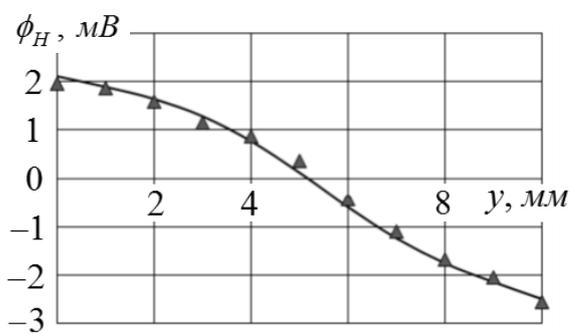
рис. 1 представлены расчеты, соответствующие случаю, когда токовые зонды малой входной площади расположены на плоской поверхности исследуемого кристалла.



а) Схема расположения токовых контактов на образце



б) Потенциал электрического поля без внешнего магнитного поля (экспериментальные значения снимались вдоль линии $y = 2b$)



в) Потенциал холловского поля во внешнем магнитном поле (экспериментальные значения снимались вдоль линии AB)

Рис. 1. – Сравнение теоретического распределения потенциала (сплошная линия) с экспериментальными значениями (точки - треугольники) для анизотропной пластины CdSb

Третья глава посвящена теоретическому обоснованию и экспериментальному апробированию оригинальных методик измерения компонент тензора удельной электропроводности и контактного сопротивления структуры металл-анизотропный полупроводник. Исследованы сопутствующие электрофизические явления.

Известно, что в анизотропных полупроводниках, вырезанных вдоль кристаллографических направлений, тензор удельной электропроводности принимает следующий вид

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 \\ 0 & \sigma_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где σ_x , σ_y – главные его направления.

В пункте 3.1 на основе выражений, приведенных во второй главе предложена методика измерения тензора электропроводности (1) анизотропных полупроводниковых пластинах квадратной формы. При этом выбраны два наиболее распространенных варианта расположения токовых и измерительных контактов на периметре образца (рис. 2).

Методика основана на измерении двух токов и напряжений при постоянном токе через соответствующие токовые электроды и сопоставления полученного результата с теоретически вычисленными значениями.

Так при первом расположении контактов (рис. 2, а) постоянный ток пропускается через электроды 1 и 2, расположенные на смежных сторонах квадратного образца. Тогда экспериментально определяются напряжения через пары контактов 1, 3 и 2, 4 и вычисляется их отношение, сопоставляющееся с теоретической функцией

$$f_1(\gamma, c/a) = \frac{U_{13}(\gamma, c/a)}{U_{24}(\gamma, c/a)} = \gamma^2 \frac{L_{13}(\gamma, c/a)}{L_{24}(\gamma, c/a)}, \quad (2)$$

зависящей только от параметра анизотропии $\gamma = \sqrt{\sigma_y/\sigma_x}$ и относительной ширины омических контактов c/a . Множители $L_{13}(\gamma, c/a)$ и $L_{24}(\gamma, c/a)$ определены теоретически.

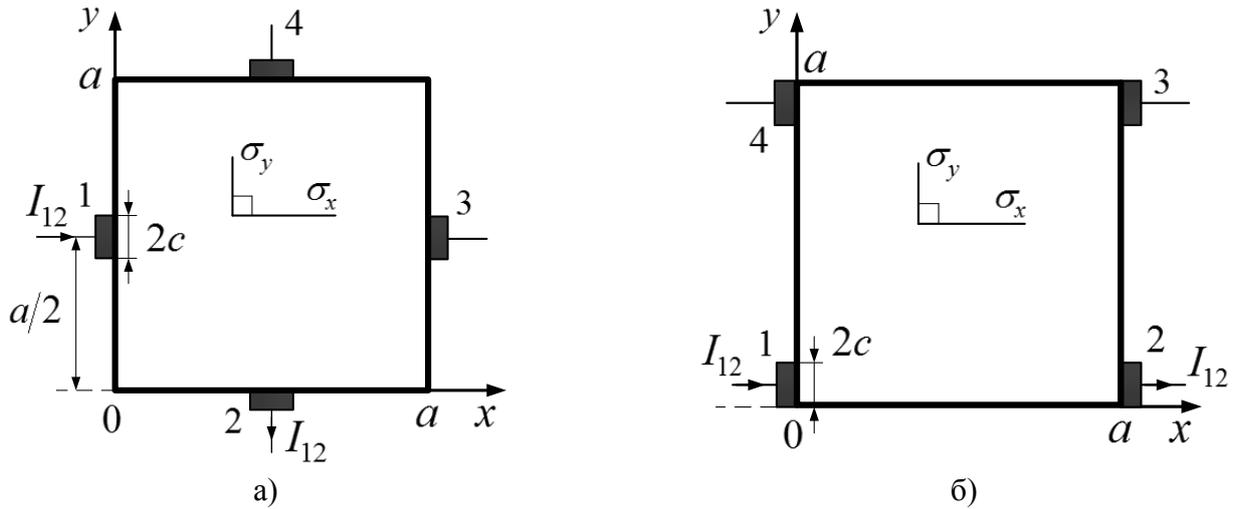


Рис. 2. – Схемы расположения контактов на периметре квадратного образца согласно модифицированному методу Ван дер Пау

При втором случае расположения (рис. 2, б) омических контактов на периметре образца экспериментально измеряется следующая пара напряжений: при постоянном токе I_{12} через электроды 1 и 2 находится напряжение U_{34} между контактами 3 и 4; при токе $I_{14} = I_{12}$ – напряжение U_{23} между парой электродов 2 и 3. После этого находится их частное, которое, как и в первом случае, сопоставляется с теоретически известной функцией данного отношения:

$$f_2(\gamma, c/a) = \frac{U_{34}}{U_{23}} = \gamma^2 \frac{L_{34}(\gamma, c/a)}{L_{23}(\gamma, c/a)}, \quad (3)$$

где множители L_{34} и L_{23} имеют определенные, полученные нами, выражения.

Из данного сравнения при известных размерах контактов определяется параметр анизотропии образца γ . По известным значениям γ и множителей L_{ij} (i, j – номера соответствующих контактов) вычисляются компоненты тензора (1).

Описанные выше предлагаемые методики имеют следующие достоинства: 1) они являются достаточно простыми в исполнении и необходимых расчётах; 2) проведен анализ применимости приближения точности контактов металл-анизотропный полупроводник; 3) являются экспрессными; 4) впервые основные зависимости представляются в простой форме – полиномиальных линий (для которых коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,99$).

Предлагаемая методика измерения компонент тензора удельной электропроводности прошла успешную экспериментальную проверку на анизотропных полупроводниковых кристаллах группы $A_{II}B_{IV}$: CdSb и CdAs₂. В таблице 1 приведены результаты применения методики (в скобках указаны контрольные значения, полученные в результате измерений стандартным двухзондовым методом). Проводимость вдоль направления [001] соответствует обозначению σ_x , а вдоль [010] – обозначению σ_y . Получено хорошее совпадение результатов предлагаемой методики с контрольными значениями (влияние дефектов на поверхностях кристалла и систематическая погрешность измерений с учетом случайной дают результаты отличающиеся от теоретических не более, чем на 5%).

Таблица 1

Образец	Схема 1		Схема 2	
	$\sigma_x, \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	$\sigma_y, \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	$\sigma_x, \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	$\sigma_y, \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$
CdSb	13,6 (14)	64,62 (64,9)	13,85 (14)	64,8 (64,9)
CdAs ₂	44,86 (45)	18,66 (18,5)	44,9 (45)	18,6 (18,5)

В трехмерном случае, когда полупроводниковый кристалл ориентирован вдоль главных направлений тензора удельной электропроводности, последний имеет вид:

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где σ_i , ($i = x, y, z$) – главные направления тензора.

В пункте 3.2 предлагается методика измерения компонент тензора электропроводности четырехзондовым методом с линейным расположением зондов (рис. 3).

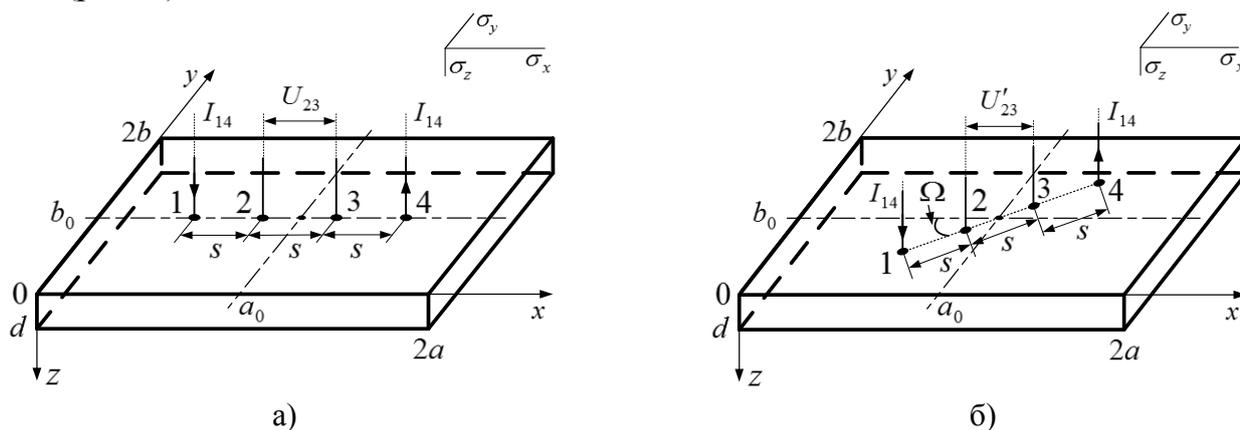


Рис. 3. – Схема расположения четырехзондового пробника на поверхности образца

Суть методики сводится к следующему. Сначала линейный зондовый пробник располагается вдоль одного из направлений кристалла (4) (рис. 3, а), через крайние зонды 1 и 4 подается постоянный ток I_{14} и измеряется напряжение U_{23} между средними зондами 2, 3. Затем измерительный пробник или образец поворачивается на некоторый угол Ω

(рис. 3, б) и при том же токе I_{14} снимается разность потенциалов U'_{23} между теми же зондами 2 и 3. После вычисляется их отношение, которое сравнивается с теоретически найденным значением функции этой дроби $f = U_{23}/U'_{23}$, зависящей, при известных параметрах образца и зондового пробника, только от параметра анизотропии γ . Из этого сопоставления вычисляется γ . Зная его и значение измеренного напряжения, вычисляют компоненты тензора удельной электропроводности.

Необходимо отметить, что методика, предложенная в пункте 3.2 действительна только в случае, если заранее известна кристаллографическая ориентация образца и две из трех компонент тензора (4) равны. При этом в работе рассмотрены практически важные случаи подобного равенства, соответствующие полупроводникам группы $A_{II}V_V$.

Достоинства данной методики заключаются в следующем: впервые предложен локальный способ измерения компонент тензора электропроводности (т.е. возможность проведения замеров в любой области плоской поверхности кристалла) путем введения координат центра пробника; позволяет контролировать однородность исследуемого образца по значению компонент тензора электропроводности; достаточно проста в реализации; выражения получены без каких-либо приближений; впервые учитывается толщина исследуемого кристалла; позволяет исследовать достаточно узкие протяженные образцы.

Таблица 2

Образец	Компоненты тензора удельной электропроводности, $\text{Om}^{-1}\text{m}^{-1}$		
	$\sigma_x, [001]$	$\sigma_y, [010]$	$\sigma_z, [100]$
CdSb	29,24	16,96	16,96
	(29,35)	(17)	(17,1)
CdAs ₂	44,86	18,66	18,66
	(45)	(19,5)	(19,6)

В таблице 2 представлены результаты измерений компонент тензора удельной электропроводности для рассматриваемой в разделе 3.2 локальной методики. Эксперимент проведен для анизотропных полупроводниковых кристаллов CdSb и CdAs₂ для кристаллографической плоскости (100) (в скобках указаны контрольные значения компонент тензора электропроводности).

Пункт 3.3 посвящен теоретическому обоснованию методики измерения контактного сопротивления перехода металл-анизотропный полупроводник. Известно, что экспериментально измеренное полное сопротивление между токовыми контактами 1 и 2 можно представить в следующем виде:

$$R = R_C + R_{12}, \quad (5)$$

где R_C – переходное контактное сопротивление, R_{12} – омическое сопротивление образца.

Переходное контактное сопротивление зависит от ряда факторов: образования оксидной пленки между металлом и полупроводником, наличия потенциального барьера, степени легирования и др. Известно, что чем меньше R_C , тем лучше контакт металл-полупроводник. Однако заранее не известно какая часть полного сопротивления R относится к контактному, а какая часть к омическому сопротивлению.

Поэтому в работе рассматривается ситуация теоретического определения омического сопротивления R_{12} между токовыми контактами при возможных их расположениях на поверхности анизотропного полупроводникового образца. При этом впервые сопротивление R_{12} представляется в следующем виде:

$$R_{12} = \frac{U_{12}}{I} = R_0 + R_{s1} + R_{s2} + R_{s12}, \tag{6}$$

где R_0 – объемное сопротивление образца, R_{s1}, R_{s2} – сопротивления растекания первого и второго контактов соответственно, R_{s12} – сопротивление, учитывающее взаимовлияние токовых контактов на сопротивление растекания друг друга.

Далее в пункте 3.3 проводится аналитическое сопоставление R_{s1}, R_{s2} и R_{s12} с объемным сопротивлением R_0 при разных параметрах образца, параметре анизотропии γ и размеров токовых контактов, и показано, что в большинстве случаев слагаемое R_{s12} в анизотропных полупроводниках прямоугольной формы вносит вклад, сравнимый с R_0 . С ростом параметра анизотропии образца этот вклад будет только расти и в ряде случаев расположения контактов на периметре образца превышает объемное сопротивление в несколько раз.

Заметим, что в случае изотропного полупроводника слагаемое R_{s12} вносит менее заметный вклад и в некоторых случаях расчетом его можно пренебречь в пределах 5% погрешности.

С учетом вышеуказанного в пункте 3.3 предлагается методика определения переходного контактного сопротивления R_C и ее экспериментальное апробирование на изотропных и анизотропных полупроводниковых кристаллах. На рис. 4 (кристаллографическому направлению $[001]$ соответствует σ_x , $[010]$ – σ_y) представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) структуры металл-анизотропный полупроводник CdSb. После снятия ВАХ было определено R_C , которое оказалось равным 13% от объемного сопротивления образца, что говорит об омичности полученных контактов в области малых токов.

Пункт 3.4 посвящен моделированию энергетического спектра, квазиимпульса Ферми и плотности квантовых состояний носителей заряда в анизотропных наноструктурах – кремниевых нанотрубках, заполненных атомами таких металлов как литий, золото, цинк и галлий. При этом у электронов на основном энергетическом уровне заметно проявляется анизотропия эффективной массы, которая влияет на электрофизические параметры нанотрубки. В работе показано, что полную энергию носителей заряда для основного квантового состояния можно представить в виде трех слагаемых – энергии расщепления уровней E_r , энергии, характеризующей глубину потенциальной ямы E_u и энергии свободного движения электронов E_0 :

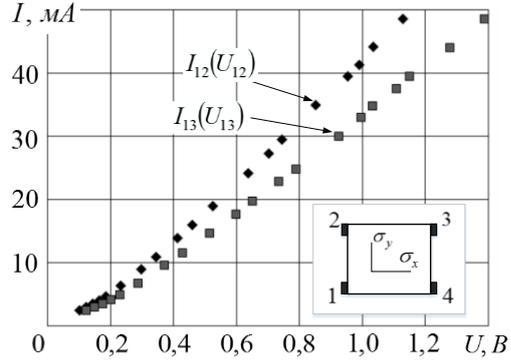


Рис. 4. – Экспериментальная ВАХ структуры металл-анизотропный полупроводник CdSb

$$E = E_r + E_u + E_0 = \frac{(f+1)\hbar}{R} \sqrt{\frac{eK}{2\pi\epsilon_0 m_{\perp}}} - \frac{e \cdot K}{4\pi\epsilon_0} + \frac{p_z^2}{2m_{\parallel}}, \quad (7)$$

где f – номер осцилляторного уровня, R – радиус НТ, K – абсолютное значение поверхностной плотности заряда НТ, m_{\perp}, m_{\parallel} – поперечная и продольная эффективные массы электрона ($m_{\perp} \approx m_e$, m_e – масса свободного электрона).

Далее в этом же пункте проводится моделирование зависимости энергии расщепления уровней и квазиимпульса Ферми от радиуса нанотрубки с учетом анизотропии эффективной массы. После этого представлено выражение для плотности состояний электронов g_f и представлены кривые зависимости $g_f(E)$ от энергии при разных значениях эффективной массы. Данные модельные результаты качественно совпадают с результатами расчетов плотностей состояний для низкоразмерных структур других авторов.

В **четвертой главе** диссертации на основе построенных физико-математических моделей представлены теоретически обоснованные оригинальные методики измерения коэффициента Холла в изотропных и анизотропных полупроводниках на основе известных зондовых методов. Исследованы сопутствующие особенности явлений переноса заряда.

Пункт 4.1 посвящен оптимизации и распространения двухзондового метода измерения удельной электропроводности на определение коэффициента Холла.

В работе для изотропных полупроводниковых структур предлагается совместное измерение удельной электропроводности и коэффициента Холла при расположении токовых контактов и измерительных зондов согласно схеме, приведенной на рис. 5,а.

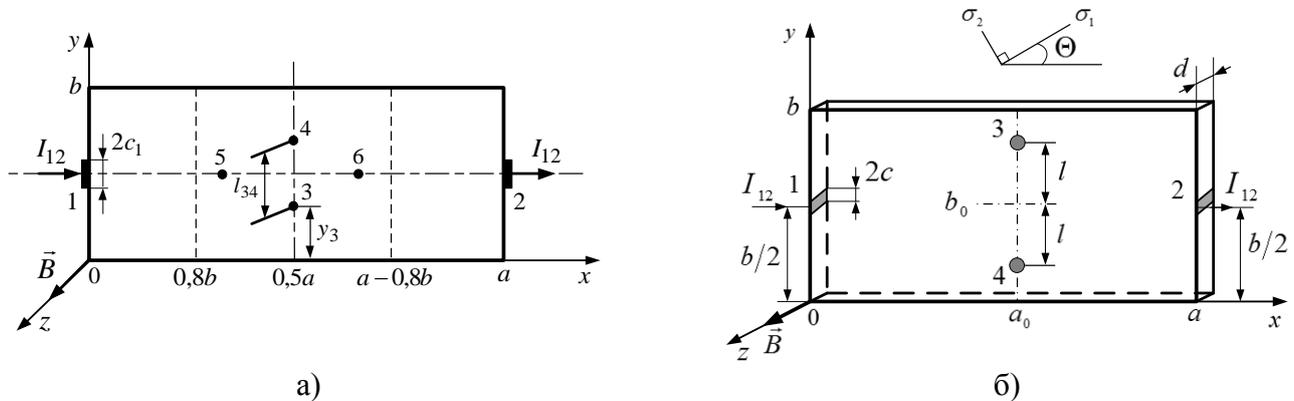


Рис. 5. – Расположение токовых контактов и измерительного двухзондового пробника на полупроводниковом образце

Проведенный анализ полученных выражений в случае изотропного образца позволил предложить следующие формулы для нахождения удельной электропроводности и коэффициента Холла в средней области полупроводника (при $0,8b \geq x \geq (a - 0,8b)$, где x – координата центра измерительного пробника вдоль линии протекания постоянного тока (см. рис. 5,а)):

$$\sigma = \frac{I_{12} \cdot l_{56}}{U_{56} \cdot d \cdot b}, \quad R = \frac{E_H \cdot d \cdot b}{I_{12} \cdot B \cdot l_{34}}, \quad (8)$$

где I_{12} – постоянный ток через контакты 1 и 2, U_{56} – измеренная разность потенциалов между точками на поверхности 5 и 6, l_{56} – расстояние между ними, d – толщина образца

и b – его ширина, l_{34} – расстояние между измерительными зондами 3 и 4, E_H – измеренная э.д.с. Холла между 3 и 4, B – значение индукции магнитного поля, направленного вдоль оси Oz .

В диссертации проведен анализ зависимости э.д.с. Холла от размеров исследуемого кристалла и показано, что для образцов с относительными размерами $a/b > 1,5$ формулы (8) применимы с погрешностью менее 3%. В этом разделе подробно проведен разбор применяемого метода обратимости контактов, т.е. когда постоянный ток протекает через зонды 3 и 4, а э.д.с. Холла снимается с токовых электродов 1 и 2 (рис. 5). Показано, что при этом в случае однородности анизотропной полупроводниковой пластины при равных токах измеряемое напряжение Холла должно быть одинаковым. Такой способ позволяет дополнительно контролировать однородность образца.

Далее в работе рассмотрен способ измерения коэффициента Холла двухзондовым методом в анизотропном образце, вырезанном под некоторым углом Θ к главным направлениям тензора удельной электропроводности. Показано, что в случае наиболее распространенной анизотропии ($\gamma = \sqrt{\sigma_y/\sigma_x} \leq 3$, где кристаллографическому направлению $[001]$ соответствует σ_x , $[010]$ – σ_y) и угле $\Theta < 35^\circ$ в средней части образца (при $0,4 < a_0/a < 0,6$, где a_0 – координата центра зондового пробника вдоль оси Ox) коэффициент Холла с погрешностью менее 5% можно также вычислять по формуле (8), приняв $l_{34} = 2l$ (рис. 5, б). В любых других случаях необходимо учитывать более сложное распределение потенциала в области анизотропного полупроводника, путем учета нелинейных слагаемых, представленных в работе.

Предложенные методики двухзондового измерения коэффициента Холла проверены экспериментально на изотропных (Si, Ge) и анизотропных (CdSb, ZnAs₂) полупроводниках. Результаты измерений представлены в таблице 3 (в скобках даны контрольные значения, полученные с использованием метода Ван дер Пау). Видно, что систематическая погрешность измерений с учетом случайных отклонений и дефектов на поверхности кристалла, не превышает 5%.

Таблица 3

Образец	Электропроводность, Ом ⁻¹ м ⁻¹	Коэффициент Холла, м ³ /Кл
Si	27,3 (26,7)	$6,75 \cdot 10^{-3}$ ($6,6 \cdot 10^{-3}$)
Ge	1477 (1470)	$2,3 \cdot 10^{-4}$ ($2,5 \cdot 10^{-4}$)
CdSb	-	$1,8 \cdot 10^{-3}$ ($2,1 \cdot 10^{-3}$)
ZnAs ₂	-	$3,3 \cdot 10^{-6}$ ($3,45 \cdot 10^{-6}$)

В пункте 4.2 предлагается оригинальная методика локального измерения (т.е. проведения измерений в любой области плоской поверхности полупроводниковой пленки) компонент тензора удельной электропроводности и коэффициента Холла в анизотропной полупроводниковой пленке прямоугольной формы четырехзондовым методом (рис. 6).

В работе на основе выражений для потенциала электрического поля, полученных во второй главе диссертации, показано, что в анизотропных полупроводниковых пленках с относительными размерами $a/b > 1,5$ коэффициент Холла в средней части образца (при $0,7 \leq a_0/a \leq 1,3$, $0,7 \leq b_0/b \leq 1,3$, где (a_0, b_0) – координаты центра пробника) с погрешностью в пределах 5% можно вычислять по следующей формуле:

$$R = \frac{E_H \cdot d \cdot b \cdot a}{I_{12} \cdot B \cdot l_1 \cdot l_2}, \quad (9)$$

где l_1, l_2 – расстояния соответственно токовых 1, 2 и измерительных 3, 4 зондов.

Для определения компонент тензора электропроводности четырехзондовым методом предлагается методика, учитывающая трехмерное распределение потенциала, создаваемого точечными зондами в образце анизотропного полупроводника.

Данная методика совместного измерения электропроводности и коэффициента Холла прошла экспериментальную проверку (результаты которой описаны в диссертационной работе) на полупроводниковых образцах Ge, CdAs₂ и CdSb. Систематическая инструментальная погрешность измеренных кинетических величин относительно эталонных, с учетом случайных отклонений и влияния дефектов на поверхности кристалла, не превышала 5%, что является достаточным условием ее возможности применения в условиях заводских лабораторий.

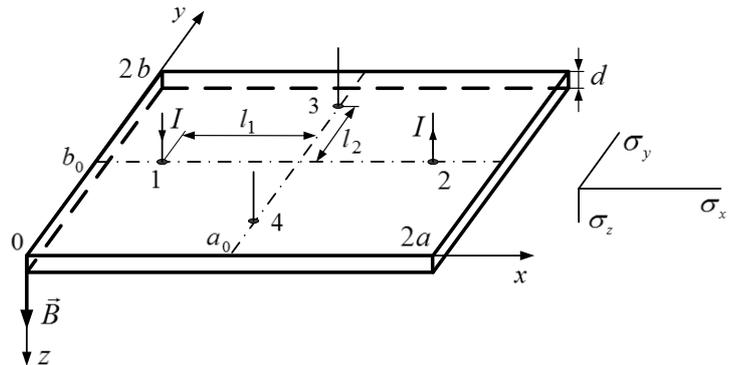


Рис. 6. – Схема расположения четырехзондового пробника на поверхности ориентированного образца

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные выводы и результаты диссертационной работы можно представить следующим образом.

На основе теоретических и экспериментальных исследований показано, что эффект концентрирования плотности электрического тока в области анизотропного полупроводникового кристалла вызывает нелинейную зависимость между силой тока и компонентами тензора удельной электропроводности. В связи с этим теоретически обоснованы и экспериментально испытаны новые оригинальные методики измерения компонент тензора удельной электропроводности анизотропных полупроводников, учитывающие данный эффект, при расположении металлических контактов согласно методу Ван дер Пау. Рассмотрены случаи, когда можно пользоваться приближением контактов малых входных сечений, впервые основные выражения представлены в виде полиномиальных функций с квадратом коэффициента достоверности не менее 0,99.

В области анизотропного полупроводника выявлена и теоретически определена неоднородность растекания тока по объему кристалла, вызванного взаимодействием положения и размера токовых контактов на ограниченном образце. Данная нелинейность учтена при разработке методики определения компонент тензора удельной электропроводности в полупроводниковых пленках четырехзондовым методом с линейным расположением зондов. Рассмотрены возможные случаи ориентированных кристаллов с различными компонентами тензора удельной электропроводности.

Впервые выявлен эффект влияния токовых контактов металл-анизотропный полупроводник на электрофизические характеристики друг друга (нелинейного по величине). Данный эффект учтен при теоретическом обосновании методики измерения

контактного сопротивления между двумя токовыми электродами, изготовленными к анизотропной полупроводниковой пластине. Впервые показано, что экспериментально определяемое сопротивление растекания можно представить в виде ряда слагаемых, учитывающих отдельно сопротивление растекания каждого из электродов, а также величины, определяющей их взаимовлияние на сопротивление растекания друг друга.

Проведено квантово-механическое моделирование электрофизических параметров, определяющих кинетические свойства анизотропных структур пониженной размерности – кремниевых нанотрубок, заполненных атомами металлов (лития, золота, цинка и галлия). Показано, что в случае легирования металлом энергетический спектр, квазиимпульс Ферми и плотность квантовых состояний возрастают с ростом параметра анизотропии эффективной массы носителей заряда (m_{\parallel}/m_{\perp}) в объеме нанотрубки и уменьшаются при увеличении радиуса нанотрубки.

Впервые выделены области на поверхности образца, помещенного в скрещенные стационарные электрические и магнитные поля, в которых выражение для э.д.с. Холла определяется линейной функцией от расстояния между измерительными зондами. В остальной части полупроводника э.д.с. Холла нелинейно зависит от координат зондов, параметра анизотропии и близости расположения границ образца, что позволило выявить практически важные рекомендации по проведению измерений в этих зонах.

Предложена оригинальная методика совместного определения компонент тензора удельной электропроводности и коэффициента Холла четырехзондовым методом с ромбовидным расположением зондов на поверхности анизотропной полупроводниковой пленки прямоугольной формы, путем учета выявленного нелинейного характера зависимости кинетических коэффициентов от величин электрического и магнитного полей.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и Scopus:

1. Филиппов, В.В. Моделирование электронных свойств кремниевых нанотрубок / В.В. Филиппов, А.А. Заворотний // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 12. – С. 21-27.

2. Поляков, Н.Н. Измерение и контроль свойств металлических контактов к полупроводниковым пластинам и пленкам / Н.Н. Поляков, А.А. Заворотний // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 9. – С. 36-40.

3. Поляков, Н.Н. Измерение коэффициента Холла и электропроводности полупроводников зондовым методом / Н.Н. Поляков, А.А. Заворотний, В.В. Филиппов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80, № 6. – С. 41-44.

4. Filippov, V.V. Solution of Neumann boundary value problem for electrical field in anisotropic region at Hall measurements / V.V. Filippov, A.A. Zavorotniy // Advanced Studies in Theoretical Physics. – 2014. – V. 8, no. 25. – P. 1135-1143. (Scopus)

5. Заворотний, А.А. Зондовые измерения эффекта Холла в анизотропных пластинах и пленках / А.А. Заворотний, В.В. Филиппов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 195-198.

6. Zavorotniy, A.A. Measurement of electroconductivity of anisotropic semiconductors by Van der Pauw method. Part 1. Contacts location in the middle of planes / A.A. Zavorotniy, V.V. Filippov // *Advanced Studies in Theoretical Physics*. – 2015. – V. 9, no. 14. – P. 685-691. (Scopus)

7. Zavorotniy, A.A. Measurement of electroconductivity of anisotropic semiconductors by Van der Pauw method. Part 2. Contacts location in the corners of the lateral plane of the sample / A.A. Zavorotniy, V.V. Filippov // *Advanced Studies in Theoretical Physics*. – 2015. – V. 9, no. 14. – P. 693-699. (Scopus)

Публикации в других изданиях:

8. Поляков, Н.Н. Математическое и компьютерное моделирование сопротивления растекания контактов к полупроводниковым пластинам и пленкам / Н.Н. Поляков, А.А. Заворотний // *Проблемы физики и технологии ее преподавания: межвузовский сборник научных трудов*. – 2012. – Вып. 11. – С. 69-74.

9. Поляков, Н.Н. Математическая и компьютерная модели сопротивления растекания контактов к анизотропным полупроводниковым пластинам и пленкам / Н.Н. Поляков, А.А. Заворотний // *Вестник Липецкого государственного педагогического университета. Серия «математика, информатика, физика и естествознание»*. – 2012. – Т. 2, Вып. 1. – С. 34-41.

10. Филиппов, В.В. Моделирование электронных свойств, наполненных металлами кремниевых нанотрубок / В.В. Филиппов, А.А. Заворотний // *Вестник Липецкого государственного педагогического университета. Серия «математика, информатика, физика и естествознание»*. – 2012. – Т. 2, Вып. 1. – С. 42-48.

11. Заворотний, А.А. Математическая и компьютерная модели сопротивления растекания точечных контактов к полупроводниковым кристаллам и пленкам / А.А. Заворотний // *Сборник научных трудов аспирантов и соискателей*. – 2013. – С. 69-75.

12. Поляков, Н.Н. Математическая модель эффекта Холла в изотропных полупроводниковых пластинах и пленках с точечными контактами / Н.Н. Поляков, А.А. Заворотний // *Вестник Липецкого государственного педагогического университета. Серия «математика, информатика, физика и естествознание»*. – 2013. – Т. 4, Вып. 1. – С. 34-41.

13. Заворотний, А.А. Локальность четырехзондового метода измерения тензора электропроводности в анизотропных полупроводниках / А.А. Заворотний, В.В. Филиппов // *Вестник Липецкого государственного педагогического университета. Серия «математика, информатика, физика и естествознание»*. – 2015. – Т. 16, Вып. 1. – С. 70-76.

14. Заворотний, А.А. Математическая и компьютерная модели гальваномагнитных эффектов в полупроводниковых кристаллах с точечными контактами / А.А. Заворотний, Н.Н. Поляков // *Физико-математическое моделирование систем: материалы IX Международного семинара. Часть 1*. – г. Воронеж, ВГТУ, 30 ноября-1 декабря 2012. – С. 44-50.

15. Заворотний, А.А. Измерение и контроль сопротивления контактов малой площади к полупроводниковым пленкам и пластинам / А.А. Заворотний, Н.Н. Поляков // *Материалы 19-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика»*. – г. Москва, г. Зеленоград, МИЭТ, 18-20 апреля 2012. – С. 27.

16. Заворотний, А.А. Измерение сопротивления растекания омических контактов к полупроводниковым образцам прямоугольной формы / А.А. Заворотний // *Материалы Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов»*. – г. Москва, МГУ, 11 апреля 2012. – С. 333.

17. Филиппов, В.В. Оценка точности расчета электрических полей постоянного тока в анизотропных полупроводниковых пластинах / В.В. Филиппов, А.А. Заворотный // Физико-математическое моделирование систем: материалы X Международного семинара. Часть 1. – г. Воронеж, ВГТУ, 28-29 июня 2013. – С. 34-42.

18. Заворотный, А.А. Эффект Холла в полупроводниковых пластинах и пленках с подвижными точечными контактами / А.А. Заворотный, Н.Н. Поляков // Материалы 20-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика». – г. Москва, г. Зеленоград, МИЭТ, 17-19 апреля 2013. – С. 45.

19. Заворотный, А.А. Моделирование эффекта Холла в полупроводниковых изотропных пластинах и пленках с подвижными точечными зондами / А.А. Заворотный // Материалы XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов». – г. Москва, МГУ, 10 апреля 2013. – Т. 2. – С. 209-210.

20. Заворотный, А.А. О локальности зондовых методов измерений эффекта Холла в полупроводниковых пластинах и пленках / А.А. Заворотный // Материалы Международной зимней школы по физике полупроводников. – г. Санкт-Петербург, г. Зеленогорск, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 28 февраля-3 марта 2014. – С. 8-9.

21. Заворотный, А.А. Локальность зондовых измерений эффекта Холла в анизотропных полупроводниковых пластинах и пленках / А.А. Заворотный, В.В. Филиппов // Физико-математическое моделирование систем: материалы XII Международного семинара. Часть 1. – г. Воронеж, ВГТУ, 27 июня 2014. – С. 45-52.

22. Заворотный, А.А. Локальность четырехзондового метода измерения тензора электропроводности в анизотропных полупроводниковых образцах прямоугольной формы / А.А. Заворотный, В.В. Филиппов // Физико-математическое моделирование систем: материалы XIII Международного семинара. Часть 1. – г. Воронеж, ВГТУ, 28-29 ноября 2014. – С. 75-84.

23. Заворотный, А.А. Измерение электропроводности анизотропных полупроводников методом Ван дер Пау (Расположение контактов по центрам граней) / А.А. Заворотный, В.В. Филиппов // Физико-математическое моделирование систем: материалы XIV Международного семинара. Часть 1. – г. Воронеж, ВГТУ, 26-27 июня 2015. – С. 86-93.

24. Заворотный, А.А. Измерение электропроводности анизотропных полупроводников методом Ван дер Пау (Расположение контактов по углам боковых граней образца) / А.А. Заворотный, В.В. Филиппов // Физико-математическое моделирование систем: материалы XIV Международного семинара. Часть 1. – г. Воронеж, ВГТУ, 26-27 июня 2015. – С. 94-100.

25. Заворотный, А.А. Моделирование энергетического спектра и плотности состояний кремниевых нанотрубок, заполненных атомами металлов / А.А. Заворотный, В.В. Филиппов // Доклады XI Всероссийской конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». – Саратов: Издательство «Техно-Декор», 6-8 сентября 2016. – С. 49-50.

26. Заворотный, А.А. Математическое моделирование эффекта взаимовлияния контактов металл-анизотропный полупроводник на электрофизические характеристики друг друга / А.А. Заворотный, В.В. Филиппов // Материалы XVIII Международного семинара «Физико-математическое моделирование систем». Часть I. – Воронеж: ВГТУ, 30 июня 2017 – С. 67-76.

27. Заворотный, А.А. Локальный четырехзондовый метод совместного измерения компонент тензора удельной электропроводности и коэффициента Холла в анизотропных полупроводниковых пленках / А.А. Заворотный // Материалы XVIII Международного семинара «Физико-математическое моделирование систем». Часть I. – Воронеж: ВГТУ, 30 июня 2017. – С. 53-66.

28. Филиппов, В.В. Распределение электрических полей при холловских измерениях в анизотропных полупроводниковых кристаллах / В.В. Филиппов, А.А. Заворотный, С.В. Мицук, С.Е. Лузянин // Материалы XVIII Международного семинара «Физико-математическое моделирование систем». Часть I. – Воронеж: ВГТУ, 30 июня 2017. – С. 77-82.

29. Заворотный, А.А. Модифицированный двухзондовый метод измерения компонент тензора удельной электропроводности анизотропных полупроводниковых пластин / А.А. Заворотный // Доклады XII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». – Саратов: Издательство «Техно-Декор», 5-7 сентября 2017. – С. 76-77.

30. Заворотный, А.А. Математическая и компьютерная модели распределения потенциала и тока в анизотропных полупроводниковых пластинах и пленках / А.А. Заворотный, Н.Н. Поляков // Материалы областной научной конференции «Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания». – г. Липецк, ЛГПУ, 29-30 марта 2012. – С. 101-109.

31. Заворотный, А.А. Математическая модель зондового метода совместных измерений электропроводности и коэффициента Холла полупроводников / А.А. Заворотный, Н.Н. Поляков // Материалы областной научно-практической конференции «Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания». – г. Липецк, ЛГПУ, 4-5 апреля 2013. – С. 35-42.

32. Заворотный, А.А. Математическая модель холловского поля при зондовых измерениях в анизотропных полупроводниках / А.А. Заворотный, В.В. Филиппов // Материалы областной научной конференции «Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания». – г. Липецк, ЛГПУ, 18 апреля 2014. – С. 72-78.

33. Заворотный, А.А. Зондовые методы определения эффекта Холла и электропроводности в изотропных полупроводниках / А.А. Заворотный, В.В. Филиппов // Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых по проблемам гуманитарных, естественных, технических наук». – г. Елец, ЕГУ им. И.А. Бунина, 5-6 июня 2014. – С. 226-230.

34. Заворотный, А.А. Методика зондовых измерений э.д.с. Холла анизотропных полупроводников / А.А. Заворотный, В.В. Филиппов // Материалы научной конференции по проблемам технических наук. – г. Липецк, ЛГТУ, 7 ноября 2014. – С. 57-60.

35. Заворотный, А.А. О локальности совместного измерения четырехзондовым методом электропроводности и коэффициента Холла в анизотропных полупроводниках / А.А. Заворотный // Материалы научной конференции молодых ученых «Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания». – Липецк: ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, 20-21 октября 2016. – С. 105-119.

Подписано в печать 21.02.2018г.
Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз.
Заказ №_____.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Липецкий государственный педагогический университет
имени П.П. Семенова-Тян-Шанского»
398020, г. Липецк, ул. Ленина, 42

Отпечатано в отделе редакционно-печатной деятельности
ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского
398020, г. Липецк, ул. Ленина, 42