

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 51-72; 535.37; 537.311.1; 537.311.322; 538.9; 539.21; 621.315.592

АНИКЕЕВ
Илья Иванович

**МИГРАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК ПО ТОЧЕЧНЫМ ДЕФЕКТАМ
В КОМПЕНСИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ЭЛЕМЕНТАХ
ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.10 — физика полупроводников

МИНСК, 2024

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель — **Поклонский Николай Александрович**,
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор
физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики полупроводников и
наноэлектроники Белорусского государственного
университета.

Официальные оппоненты: **Кушнир Василий Николаевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры теоретической физики и
астрофизики Белорусского государственного
университета;

Соболь Валерий Романович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики и методики
преподавания физики УО «Белорусский
государственный педагогический университет
имени Максима Танка».

Оппонирующая организация — **ГНПО «НПЦ НАН Беларуси
по материаловедению».**

Защита состоится 13 декабря 2024 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407; телефон ученого секретаря (017) 209-57-09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан 01 ноября 2024 года

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор физико-математических наук
профессор



А.К. Федотов

ВВЕДЕНИЕ

Исследования стационарной электропроводности легированных и компенсированных кристаллических полупроводников актуальны для разработки и создания терморезисторов и инфракрасных фотодетекторов, работающих при криогенных температурах¹⁾.

Изучение излучательной донорно-акцепторной рекомбинации важно при создании светоизлучающих полупроводниковых приборных структур и в качестве высокочувствительного метода неразрушающего контроля однородности распределения примесей в кристаллической матрице²⁾.

Мотивацией к теоретическому исследованию прыжковой фотопроводимости по точечным дефектам в трех зарядовых состояниях $[(-1, 0, +1)$ в единицах элементарного заряда e] кристаллической матрицы частично разупорядоченных полупроводников является возможность создания на их основе радиационно-стойких элементов приборных структур, в частности элемента Пельтье, работающих в околоземном космическом пространстве³⁾.

Элементы приборных структур на основе пленок аморфного гидрогенизированного кремния (a -Si:H), электрические свойства которых обусловлены как пассивацией атомами водорода, так и самокомпенсацией ненасыщенных химических связей Si–Si, уже используются в качестве фотодиодов, транзисторов, пьезорезисторов, детекторов электромагнитных волн инфракрасного диапазона и т. д. Однако низкочастотный конденсатор на основе пленки a -Si:H, работающий при лабораторных условиях, может найти применение в биомедицине, например в электрических цепях регистрации низкочастотных сигналов.

Актуальность темы диссертационной работы определяется необходимостью исследования миграции электронов и дырок по точечным дефектам кристаллической структуры в кристаллических и аморфных полупроводниковых материалах и элементах приборных структур на их основе.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Исследования по теме диссертации выполнялись на кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета Белорусского госу-

¹⁾ Progress and challenges in blocked impurity band infrared detectors for space-based astronomy / Y. Xiao [et al.] // Sci. China: Phys. Mech. Astron. – 2022. – Vol. 65, № 8. – P. 287301 (1–17).

²⁾ Tajima, M. Systematic variation of photoluminescence spectra with donor and acceptor concentrations ranging from 1×10^{10} to 1×10^{20} cm^{-3} in Si / M. Tajima, H. Toyota, A. Ogura // Jpn. J. Appl. Phys. – 2022. – Vol. 61, № 8 – P. 080101 (1–16).

³⁾ Design of Peltier element based on semiconductors with hopping electron transfer via defects / N.A. Poklonski [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2021. – Vol. 12, № 1. – P. 13–22.

дарственного университета. Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг. (Указ № 156 Президента Республики Беларусь от 07.05.2020, п. 4 Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы).

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных в рамках научно-исследовательских работ: 1) «Электрическая поляризация низкоразмерных полупроводниковых систем» (грант Министерства образования Республики Беларусь, № гос. рег. 20220580, срок выполнения 2022 г.), 2) «Оптические, электрические и магнитные свойства имплантированных легкими ионами и облученных быстрыми нейтронами алмазов» (проект БРФФИ № Ф21РМ-137, № гос. рег. 20213276, срок выполнения 2021–2023 гг.), 3) «Электронные и ионные процессы в полупроводниковых системах и приборных структурах» (ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», № гос. рег. 20211654, срок выполнения 2021–2025 гг.), 4) «Исследовать квазидвумерные материалы с дискретными и непрерывными нарушениями симметрии для целей нанофотоники и магнитоэлектроники» (ГПНИ «Конвергенция-2025», № гос. рег. 20211796, срок выполнения 2021–2025 гг.).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель работы — аналитическое и численное описание стационарной электрической проводимости легированных компенсированных полупроводников, термической энергии активации прыжковой миграции электронов и дырок по водородоподобным примесям, бесфононной донорно-акцепторной фотолюминесценции, прыжковой фотопроводимости по точечным трехзарядным дефектам, электрической емкости и сдвига фаз между током и напряжением в элементах приборных структур на основе аморфных полупроводников.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**: 1) разработать модель для количественного описания электропроводности и коэффициента Холла на постоянном токе ковалентных полупроводников в области температур сосуществования зонной и прыжковой электропроводностей; 2) рассчитать туннельную электрическую проводимость сильно легированных умеренно компенсированных полупроводников в окрестности концентрационного фазового перехода изолятор–металл (перехода Мотта); 3) аналитически рассчитать префактор и энергию термической активации стационарной прыжковой электропроводности слабо и умеренно легированных умеренно компенсированных полупроводников (на примере кристаллов $p\text{-Ge:Ga}$); 4) количественно рассчитать уменьшение значения величины энергии термической активации ε_2 -электропроводности слабо компенсированных ковалентных полупроводников с увеличением концентрации основных водородопо-

добных примесей; 5) развить модель кулоновской блокады носителей заряда, создаваемой полем компенсирующих примесей, для расчета термической энергии активации прыжковой электропроводности на постоянном токе по ближайшим водородоподобным примесям в слабо легированных и слабо компенсированных кристаллических полупроводниках; 6) рассчитать спектральное положение максимума линии бесфононной донорно-акцепторной фотолуминесценции в ковалентных полупроводниках с водородоподобными примесями при низких (гелиевых) температурах и низких уровнях стационарного межзонного фотовозбуждения; 7) развить модель прыжковой фотопроводимости по трехзарядным (-1, 0, +1) точечным дефектам в однородно разупорядоченных легированных полупроводниках; 8) разработать структурную и электрическую схемы конденсатора с рабочим веществом «изолятор – аморфный гидрогенизированный кремний – изолятор» и рассчитать частотные зависимости в диапазоне от 0,1 Гц до 300 Гц его электрической емкости и сдвига фаз между током и напряжением при малосигнальном режиме измерения.

Объект исследования — кристаллические ковалентные полупроводники, легированные водородоподобными примесями и компенсированные в слабом (до 15 %) и умеренном (от 15 % до 85 %) пределах; однородно разупорядоченные полупроводники с трехзарядными точечными дефектами; низкочастотный конденсатор с рабочим веществом на основе аморфного гидрогенизированного кремния.

Предмет исследования — электропроводность и коэффициент Холла на постоянном токе в области температур сосуществования зонного и прыжкового режимов миграции носителей заряда; стационарная туннельная электрическая проводимость; термическая энергия активации прыжковой электропроводности; спектральное положение максимума линии бесфононной донорно-акцепторной фотолуминесценции; прыжковая фотопроводимость по трехзарядным точечным дефектам; электрическая емкость и сдвиг фаз между током и напряжением низкочастотного конденсатора с рабочим веществом «изолятор – аморфный гидрогенизированный кремний – изолятор».

Научная новизна

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем: 1) рассчитаны зависимости электрической проводимости на постоянном токе от концентрации водородоподобных примесей в ковалентных полупроводниках при температуре, соответствующей равенству зонной и прыжковой электропроводностей; 2) рассчитана слабо зависящая от температуры стационарная туннельная электропроводность в сильно легированных умеренно компенсированных полупроводниках вблизи концентрационного фазового перехода Мотта; 3) получены формулы для расчета концентрационных зависимо-

стей префактора и энергии термической активации стационарной прыжковой электропроводности с учетом тепловой и конфигурационной энтропии слабо и умеренно легированных умеренно компенсированных полупроводников с водородоподобными примесями (на примере $p\text{-Ge:Ga}$); 4) разработана модель формирования порога туннельной подвижности носителей заряда в примесных зонах, позволяющая рассчитать концентрационную зависимость величины энергии активации ε_2 -электропроводности слабо компенсированных ковалентных полупроводников; 5) развита теоретическая модель кулоновской блокады носителей заряда, создаваемой полем компенсирующих примесей, для расчета термической энергии активации ε_3 стационарной прыжковой электропроводности по ближайшим соседям в слабо легированных и слабо компенсированных кристаллических полупроводниках с водородоподобными примесями; 6) дано количественное описание зависимостей спектрального положения максимума бесфононной линии донорно-акцепторной фотолюминесценции кристаллических ковалентных полупроводников от концентрации и степени компенсации водородоподобными примесями с учетом электростатических флуктуаций потенциальной энергии ионов примесей при низких температурах и низких уровнях стационарного межзонного фотовозбуждения; 7) развита модель фотопроводимости при прыжковой миграции электронов по трехзарядным точечным дефектам в однородно разупорядоченных легированных полупроводниках; 8) разработана теоретическая модель низкочастотного конденсатора с рабочим веществом «изолятор – аморфный гидрогенизированный кремний – изолятор», а также рассчитаны его электрическая емкость и сдвиг фаз между током и напряжением при малосигнальном режиме измерения.

Положения, выносимые на защиту

1. Низкотемпературная стационарная электропроводность кристаллических полупроводников со степенью компенсации (отношением концентраций неосновных и основных водородоподобных примесей) от 15 % до 85 % при концентрации основных примесей в окрестности концентрационного фазового перехода изолятор–металл обусловлена безактивационным туннелированием электронов (или дырок) между ближайшими по расстоянию основными примесями с уровнями энергии в окрестности уровня Ферми, отделенного энергетической щелью от порога дрейфовой подвижности c - или v -зоны. Результаты расчетов туннельной электропроводности по предложенным формулам, количественно согласующиеся с экспериментальными данными для $n\text{-Ge:As}$, $p\text{-Ge:Ga}$, $p\text{-Dia:B}$, $n\text{-Si:P}$, $n\text{-ZnSe:Al}$, $n\text{-GaAs:Ge}$, $n\text{-GaAs:Sn}$, $n\text{-InSb}$ и $n\text{-InP}$.

2. Аналитические выражения для электропроводности $\sigma(T_j)$ и коэффициента Холла $R_H(T_j)$ в кристаллических ковалентных полупроводниках с водородоподобными примесями при температуре T_j , соответствующей равенству зонной и

прыжковой электропроводностей на изоляторной стороне концентрационного фазового перехода изолятор–металл, а также префактора σ_{03} прыжковой ϵ_3 -электропроводности для степеней компенсации от 15 % до 85 % при характерной температуре $T_3 = T_j/3$, в области которой реализуются термически ассистированные акты туннелирования электронов (или дырок) между ближайшими по расстоянию основными примесями. Результаты расчетов $\sigma(T_j)$, $R_H(T_j)$ и σ_{03} по полученным формулам, количественно согласующиеся с известными экспериментальными данными для кристаллов германия и кремния *n*- и *p*-типов.

3. Модель «нестехиометрической примесной решетки» в кристаллической ковалентной матрице для расчета зависимости термических энергий активации ϵ_2 и ϵ_3 прыжковой электропроводности по водородоподобным примесям от их концентрации и степени компенсации при учете кулоновских корреляций носителей заряда и ионов примесей: 1) ϵ_2 -электропроводности слабо компенсированных (до 10 %) сильно легированных (вплоть до концентрационного фазового перехода изолятор–металл при концентрации N_M основной примеси) полупроводников; 2) ϵ_3 -электропроводности слабо компенсированных (до 5 %) слабо легированных (до 5 % от концентрации N_M) кристаллов; 3) ϵ_3 -электропроводности умеренно компенсированных (от 15 % до 85 %) в пределах слабого и умеренного легирования полупроводников. Результаты расчетов энергий активации ϵ_2 и ϵ_3 по полученным формулам, количественно согласующиеся с известными экспериментальными данными для германия и кремния *n*- и *p*-типов.

4. Аналитические и численные расчеты сдвига в область низких энергий спектрального положения максимума бесфононной линии донорно-акцепторной фотолюминесценции в кристаллах германия при увеличении концентрации примесей, количественно согласующиеся с экспериментальными данными. Расчеты параметров прыжковой миграции электронов между трехзарядными ($-1, 0, +1$) дефектами в полупроводниках, предсказывающие: 1) отрицательную прыжковую фотопроводимость, обусловленную стимулированными подсветкой переходами электронов между дефектами в зарядовых состояниях (0), приводящими к уменьшению их концентрации при увеличении интенсивности подсветки; 2) немонотонную зависимость сдвига фаз (в диапазоне от -90° до -65°) между током и напряжением от частоты измерительного сигнала (0,1 Гц–300 Гц) для конденсатора с рабочим веществом, состоящим из слоя *a*-Si:H толщиной 3 мкм (отделенного слоями SiO₂ толщиной 0,3 мкм от электродов) при температуре 300 К.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертации основные результаты получены соискателем лично под руководством доктора физико-математических наук, профессора Н.А. Поклонского, члена-корреспондента НАН Беларуси, который сформулировал задачи и направления исследования, участвовал в получении, обсужде-

нии и представлении материалов для опубликования в научных журналах. Кандидат физико-математических наук С.А. Вырко участвовал в обсуждении методов аналитических и численных расчетов и их результатов, а также представлении материалов для опубликования в научных журналах. Доктор физико-математических наук А.Г. Забродский, академик РАН, участвовал в обсуждении и представлении полученных результатов для печати.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Полученные в диссертации результаты прошли апробацию на международных конференциях: X Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, 12–14 октября 2022 г.), 7-й Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 18–19 мая 2023 г.), X Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, 22–26 мая 2023 г.).

Результаты диссертации внедрены в образовательный процесс на кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники, кафедре физики твердого тела и нанотехнологий, кафедре физической оптики и прикладной информатики физического факультета БГУ (имеется 4 акта о практическом использовании).

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе в 8 статьях в научных журналах в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (общим объемом 8,9 авторского листа), 2 статьях в сборниках материалов научных конференций и 1 тезисах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 162 страницы, включая 35 рисунков (на 20 страницах), 5 таблиц (на 3 страницах) и 1 приложение (на 8 страницах). Библиографический список содержит 293 наименования, включая 11 публикаций соискателя (на 24 страницах).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В главе 1 приведен аналитический обзор литературы по тематике диссертационной работы, из которого следуют поставленные задачи.

В главе 2 разработаны квазиклассические модели электрической проводимости на постоянном токе в объемных легированных и компенсированных полупроводниках при температурах $T \leq T_j$. Здесь T_j — характерная температура перехода

от зонной электропроводности по делокализованным состояниям c - или v -зоны к прыжковой электропроводности по квазилокализованным состояниям электронов или дырок на водородоподобных примесях в кристаллической матрице. Рассмотрены полупроводники с уровнями легирования основными примесями от слабого до сильного пределов, а также в диапазоне степеней компенсации от слабых до умеренных на изоляторной стороне концентрационного фазового перехода Мотта. Учтены среднеквадратичные флуктуации уровней энергии атомов основной примеси. Также учтено смещение дна c -зоны в полупроводниках n -типа (или потолка v -зоны в полупроводниках p -типа) в глубь запрещенной зоны. Для умеренно компенсированных ковалентных полупроводников дополнительно численно рассчитаны концентрационные зависимости коэффициента Холла при температуре T_j .

В разделе 2.1 дано количественное описание концентрационных зависимостей стационарной электропроводности $\sigma_j = \sigma(T_j)$ и коэффициента Холла $R_{Hj} = R_H(T_j)$ при абсолютной температуре $T = T_j$. Учтен сдвиг потолка v -зоны (или дна c -зоны) в глубь запрещенной зоны, из-за формирования квазинепрерывной полосы разрешенных значений энергии при объединении возбужденных состояний электронейтральных основных примесей. Предполагается, что уровни энергии атомов основных примесей имеют гауссово распределение в запрещенной зоне полупроводника. При этом показано, что среднеквадратичные флуктуации потенциальной энергии дырок v -зоны (или электронов c -зоны) меньше среднеквадратичных флуктуаций уровней энергии акцепторов (или доноров). Сравнение результатов расчетов по полученным формулам электрического сопротивления $\rho_j = 1/\sigma_j$ и коэффициента Холла R_{Hj} при величине холл-фактора, равной 1, показывает количественное согласие с экспериментальными данными для кристаллов p -Ge при степени компенсации $K = 0,3-0,4$, для n -Ge при $K = 0,02-0,06$, для p -Si при $K = 0,01-0,03$ и для n -Si при $K = 0,01-0,06$.

В разделе 2.2 развита решеточная модель туннельной электрической проводимости σ_t на постоянном токе в сильно легированных умеренно компенсированных полупроводниках в пределе нулевой абсолютной температуры ($T \rightarrow 0$ К) в окрестности перехода Мотта. В рамках модели рассмотрен кристаллический полупроводник n -типа, содержащий водородоподобные доноры в зарядовых состояниях (0) и (+1) с концентрацией $N_d = N_{d,0} + N_{d,+1}$, между которыми происходят туннельные переходы электронов. Все компенсирующие водородоподобные акцепторы находятся в зарядовом состоянии (-1) с концентрацией $N_a = N_{a,-1} = KN_d$, где $0 < K = N_a/N_d < 1$ — степень компенсации доноров акцепторами. Распределение плотности состояний электронов в донорной зоне считается гауссовым. Среднеквадратичные флуктуации (эффективная ширина донорной $D^{0/+}$ -зоны) при учете только кулоновского взаимодействия донора в зарядовом состоянии (+1) с ионами 1-й координационной сферы условной не-

стехиометрической примесной решетки с периодом трансляции $d_{\text{im}} = 2R_{\text{im}}$ есть: $W_d = (e^2/4\pi\epsilon_r\epsilon_0 d_{\text{im}})[12K/(1+K)]^{1/2}$, где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 — электрическая постоянная. В пределе $T \rightarrow 0$ К концентрация электронов c -зоны $n \ll K(1-K)N_d$ и выполняется условие электронейтральности: $N_{d,+1} = n + N_{a,-1} \approx KN_d = N_a$, т. е. $2K = 1 - \text{erf}[(E_F^{(c)} + I_d)/\sqrt{2}W_d]$, где $\text{erf}(\cdot)$ — функция ошибок, $E_F^{(c)} < 0$ — уровень Ферми для электронов, $I_d = e^2/8\pi\epsilon_r\epsilon_0 a_{ni}$ — энергия ионизации одиночного донора с боровским радиусом орбиты электрона a_{ni} в кристалле n -типа. Принимается, что электроны туннелируют в энергетической полосе $D^{0/+}$ -зоны шириной $2\Delta_{dt} = \delta E_{dt}$ в окрестности уровня Ферми $E_F^{(c)}$ между (квази)резонасными парами доноров в зарядовых состояниях (0) и (+1) за время $\tau_t = \pi\hbar/\delta E_{dt}$, где \hbar — приведенная постоянная Планка, $\delta E_{dt}(E_F^{(c)})$ — квантовомеханическое расщепление уровней энергии доноров в зарядовых состояниях (0) и (+1), $E_{dt} = E_m^{(c)} - E_F^{(c)} > 0$ — барьер для туннельных переходов электронов между донорами; $E_m^{(c)} = -I_d a_{ni}/R_{\text{im}} < 0$ — порог дрейфовой подвижности для электронов c -зоны. При $T \rightarrow 0$ К переходы электронов вблизи уровня Ферми $E_F^{(c)}$ в $D^{0/+}$ -зоне приводят к удельному электрическому сопротивлению $\rho_t = 1/\sigma_t$, слабо зависящему от температуры. Доля пар доноров в зарядовых состояниях (0) и (+1), уровни энергии E_d которых отстоят от уровня Ферми ($-E_F^{(c)} > 0$) на величину $\pm\Delta_{dt}$, т. е. $(-E_F^{(c)} - \Delta_{dt} - I_d) \leq E_d - I_d \leq (-E_F^{(c)} + \Delta_{dt} - I_d)$, определяется соотношением:

$$\Theta_t = \frac{1}{2K(1-K)} \left[\text{erf}\left(\frac{E_F^{(c)} + \Delta_{dt} + I_d}{\sqrt{2}W_d}\right) - \text{erf}\left(\frac{E_F^{(c)} - \Delta_{dt} + I_d}{\sqrt{2}W_d}\right) \right] < 1. \quad (1)$$

В итоге туннельная электрическая проводимость $\sigma_t = 1/\rho_t$ по донорам при $T \rightarrow 0$ К дается выражением:

$$\sigma_t(0) = \frac{1}{\rho_t(0)} = \frac{e^2 K(1-K)N_d \tau_t}{2m_{n\sigma}} \Xi_d \Theta_t, \quad (2)$$

где $\Xi_d = 1/(1+K)$ — доля доноров в узлах примесной решетки; $m_{n\sigma}$ — эффективная масса электропроводности электрона c -зоны.

Результаты расчетов по формулам (1) и (2) туннельного удельного электрического сопротивления ρ_t согласуются с известными экспериментальными данными для сильно легированных умеренно компенсированных ($0,15 < K < 0,85$) кристаллических полупроводников (Ge, алмаз, Si, ZnSe, GaAs, InSb, InP).

В разделе 2.3 в пределах умеренного и сильного легирования и для умеренных степеней компенсации на примере кристаллов германия p -типа в рамках решеточной модели рассчитан префактор σ_{03} прыжковой электропроводности $\sigma_h = \sigma_{03} \exp(-\epsilon_3/k_B T)$ на постоянном токе по акцепторам. Здесь ϵ_3 — энергия термической активации прыжковой миграции дырок между зарядовыми состояниями (0) и (-1) акцепторов, k_B — постоянная Больцмана. При расчете σ_{03} учтен сдвиг потолка v -зоны в глубь запрещенной зоны полупроводника на величину $\delta E_v = -E_m^{(v)} = 2I_a a_{pi}/d_{\text{im}} > 0$. Считается, что в кристаллической матрице

акцепторы в зарядовых состояниях (0) и (-1) вместе с донорами в зарядовом состоянии (+1) образуют единую простую нестехиометрическую кубическую решетку. Рассмотрены два варианта кубической решетки, отличающиеся периодами трансляции. Для 1-го варианта период трансляции есть $d_{im1} \approx 1,24[(1 + K)N_a]^{-1/3}$, для 2-го варианта $d_{im2} \approx 0,867[(1 + K)N_a]^{-1/3}$. Также принимается, что уровни энергии акцепторов в запрещенной зоне имеют гауссову плотность распределения. Ширина акцепторной зоны есть: $W_a = (e^2/4\pi\epsilon_r\epsilon_0 d_{im})[12K/(1 + K)]^{1/2}$. Значения величины σ_{03} рассчитаны для характерной температуры $T_3 = T_j/3$, в области которой наблюдаются термически активированные туннельные прыжки дырок между ближайшими по расстоянию атомами галлия в зарядовых состояниях (0) и (-1) [NNH-проводимость]. Учтено, что при увеличении уровня легирования в «молекулярных парах» акцепторов их уровни энергии расщепляются на величину δE_{at} . Считается, что прыжки дырок по состояниям акцепторов реализуются в энергетической полосе шириной $\sqrt{3}\delta E_{at}$ в окрестности уровня Ферми в акцепторной зоне. При расчетах величины σ_{03} впервые учтено влияние тепловой и конфигурационной энтропии. Результаты расчета зависимостей σ_{03} от концентрации атомов галлия в единицах $a_{pi}N_a^{1/3}$ при фиксированной степени компенсации $K = 0,35$ и от степени компенсации K при концентрации атомов галлия $N_a = 2,66 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ согласуются с известными экспериментальными данными для кристаллов $p\text{-Ge:Ga}$.

В главе 3 построена электростатическая модель термической энергии активации ϵ_2 -электропроводности слабо легированных слабо компенсированных объемных ковалентных полупроводников. Также разработаны модели ϵ_3 -электропроводности на постоянном токе и в их рамках рассчитаны энергии термической активации ϵ_3 по водородоподобным примесям в слабо и умеренно компенсированных полупроводниках в пределах слабого и умеренного уровней легирования.

В разделе 3.1 дан расчет энергии термической активации ϵ_2 -электропроводности слабо компенсированных полупроводников в рамках электростатической модели в предположении безактивационной туннельной миграции носителей заряда вблизи порога туннельной подвижности между основными водородоподобными примесями в электрически нейтральных состояниях. На примере полупроводника p -типа показано, что потолок v' -зоны для дырок соответствует порогу туннельной подвижности $E_{ta}^{(v)} < 0$. Ширина v' -зоны равна порогу дрейфовой подвижности $E_m^{(v)} < 0$ плюс кулоновская корреляционная энергия взаимодействия двух акцепторов в зарядовых состояниях (-1) и (+1). Энергия активации ϵ_2 определяется как разность между уровнем Ферми $E_F^{(v)}$ и порогом туннельной подвижности $E_{ta}^{(v)}$ и имеет вид:

$$\epsilon_2 = -E_F^{(v)} + E_{ta}^{(v)} \approx -E_F^{(v)} - 1,376 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} [(1 + K)N_a]^{1/3}, \quad (3)$$

где величина $E_F^{(v)} < 0$ находится из условия электронейтральности: $N_{a,-1} = N_d = KN_a$.

Расчет величины ε_2 по формуле (3) проведен для кристаллов p -Si:B, n -Si:P со степенями компенсации $K \leq 0,1$ и для кристаллов n -Ge:Sb с $K \leq 0,05$ в диапазоне от $0,1N_M$ до N_M , где N_M — концентрация атомов основной примеси, соответствующая переходу Мотта. Результаты расчетов значений ε_2 по разработанной модели согласуются с известными экспериментальными данными.

В разделе 3.2 предложена модель кулоновской блокады для расчета термической энергии активации ε_3 -электропроводности на постоянном токе по ближайшим соседям в слабо легированных слабо компенсированных кристаллических полупроводниках с водородоподобными примесями. В рамках этой модели принимается, что ε_3 -электропроводность реализуется путем термически активированного преодоления носителями заряда кулоновской блокады в примесной зоне. Кулоновская блокада создается полем компенсирующих примесей-ловушек. По сути, предложена модель «отрыва» зарядового состояния легирующей примеси от взаимно ближайшего иона компенсирующей примеси. Считается, что доноры и акцепторы случайно (пуассоновски) распределены по кристаллу, и прыжки одиночных дырок происходят только между акцепторами в зарядовых состояниях (0) и (-1) в полупроводнике p -типа (или электронов между донорами в зарядовых состояниях (0) и (+1) в полупроводнике n -типа). Рассматриваются только взаимно ближайшие ионы донора и акцептора (так называемые «1-комплексы»). Расстояние между «электрически связанными» основными примесями принималось равным критическому (перколяционному) радиусу $R_{\text{per}} \approx 0,867[(1 + K)N_{a(d)}]^{-1/3}$. При длине прыжка R_{per} носителей заряда между атомами основной примеси в образце образуется сквозной электропроводящий канал. В результате термической активации при характерной температуре $T_3 = T_j/3$, соответствующей области NН-проводимости, зарядовое состояние (-1) акцептора «отрывается» от взаимно ближайшего иона донора в полупроводнике p -типа [или зарядовое состояние (+1) донора «отрывается» от взаимно ближайшего иона акцептора в полупроводнике n -типа] при критическом радиусе R_{per} и начинает прыжковым образом мигрировать по кристаллу.

Для полупроводника p -типа термическая энергия активации ε_3 определяется как средняя работа в кулоновском поле напряженностью $E(\rho) = e/4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0\rho^2$, создаваемом ионом донора, необходимая для прыжкового перемещения зарядового состояния (-1) акцептора от взаимно ближайшего донора в зарядовом состоянии (+1) из точки с координатой $\rho = r = R_{\text{per}}$ на бесконечность $\rho = \infty$:

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{C_3} \int_{R_{\text{per}}}^{\infty} P_{\text{cor}}(r) \left(\int_r^{\infty} eE(\rho) d\rho \right) dr = \frac{1}{C_3} \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0} \int_{R_{\text{per}}}^{\infty} \frac{P_{\text{cor}}(r)}{r} dr; \quad C_3 = \int_{R_{\text{per}}}^{\infty} P_{\text{cor}}(r) dr, \quad (4)$$

где $P_{\text{cor}}(r) dr = 4\pi r^2 dr [N_{a,-1}(r) + KN_a] \exp(-4\pi \int_0^r l^2 [N_{a,-1}(l) + KN_a] dl)$ — вероятность

обнаружить взаимно ближайшую пару «ион акцептора – ион донора» в интервале расстояний $(r, r + dr)$ между ними с учетом кулоновского притяжения иона акцептора к иону донора; $N_{a,-1}(l) = N_{a,-1}(r)$ — концентрация ионов акцепторов.

Сравнение результатов расчетов по формуле (4) с известными экспериментальными данными для трехмерных ковалентных кристаллов (n - и p -Ge; n - и p -Si) показывает их количественное согласие.

В разделе 3.3 на основе модели, предложенной в разделе 2.3, рассчитана термическая энергия активации ε_3 прыжковой электропроводности на постоянном токе по водородоподобным примесям на примере кристаллов p -Ge:Ga. Считается, что акцепторы и доноры формируют в кристаллической матрице единую нестехиометрическую простую кубическую решетку. Для расчета величины ε_3 предварительно определяется характерная температура $T_3 = T_j/3$, в области которой наблюдаются ассистированные фононами туннельные прыжки дырок между ближайшими по расстоянию акцепторами в зарядовых состояниях (0) и (-1). Учтено, что уровни энергии «молекулярной» пары акцепторов в зарядовых состояниях (0) и (-1) расщепляются на величину δE_{at} с увеличением уровня легирования кристалла. Считается, что прыжки дырок происходят в энергетической полосе шириной $\sqrt{3}\delta E_{at}$ вблизи уровня Ферми по состояниям акцепторной зоны. Впервые при расчете значений величины ε_3 учтено влияние тепловой и конфигурационной энтропии. Результаты расчета зависимостей ε_3 от концентрации атомов галлия в безразмерных единицах $a_{pi}N_a^{1/3}$ при фиксированной степени компенсации $K = 0,35$ и от степени компенсации K при концентрации атомов галлия $N_a = 2,66 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ согласуются с известными экспериментальными данными для кристаллов p -Ge:Ga.

В главе 4 в рамках решеточной модели дано количественное описание бесфононной донорно-акцепторной (DA) рекомбинации в полупроводниках на примере кристаллов германия. Также предложена модель для расчета стационарной прыжковой фотопроводимости в однородно разупорядоченном полупроводнике с собственными точечными дефектами одного сорта, которые могут находиться в трех зарядовых состояниях (-1, 0, +1). Предложены структурная и электрическая схемы низкочастотного конденсатора с рабочим веществом «изолятор – аморфный гидрогенизированный кремний с прыжковой проводимостью – изолятор». Для такого конденсатора при абсолютной температуре $T = 300 \text{ К}$ в отсутствие подсветки рассчитаны зависимости действительной и мнимой частей комплексной электрической емкости, и сдвига фаз между током и напряжением от частоты синусоидального измерительного сигнала малой амплитуды.

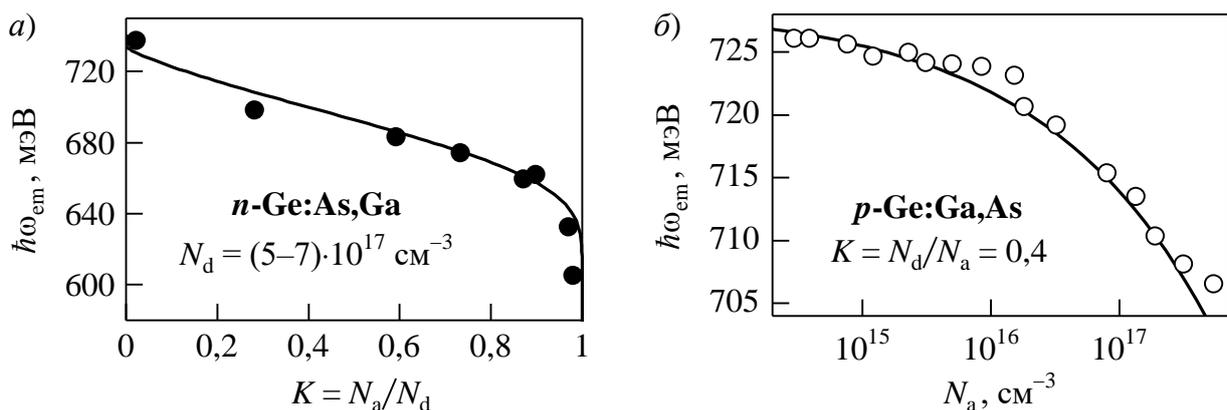
В разделе 4.1 предложена формула для расчета зависимости положения максимума линии бесфононной DA фотолюминесценции в ковалентных кристаллах германия в зависимости от концентрации основных водородоподобных примесей и степени их компенсации неосновными водородоподобными приме-

сями. Рассмотрен полупроводник n -типа при низких уровнях стационарного межзонного фотовозбуждения и гелиевых температурах. Принято, что 1) доноры и акцепторы формируют в кристаллической матрице «нестехиометрическую простую кубическую примесную решетку» с периодом трансляции $d_{im} \approx 1,24[(1 + K)N_d]^{-1/3}$; 2) распределение уровней энергии и основных, и возбужденных состояний доноров и акцепторов в запрещенной энергетической зоне гауссово. Тогда эффективные ширины донорной и акцепторной зон равны $W_d = W_a = (e^2/4\pi\epsilon_r\epsilon_0 d_{im})[12K/(1 + K)]^{1/2}$. Также предположено, что в полупроводнике n -типа акт бесфононной излучательной DA-рекомбинации происходит между неравновесной дыркой с первого возбужденного состояния акцептора с уровнем энергии $I_a/4 > 0$ и неравновесным электроном донора с уровнем энергии, совпадающим с уровнем Ферми $E_F^{(c)} < 0$ в донорной зоне. Значение энергии фотона, испускаемого в одном акте бесфононной DA-рекомбинации, есть:

$$\hbar\omega_{em} = I_g - I_a/4 + E_F^{(c)} - U_{-1,+1}^{(da)} - 2\sqrt{2}W_d, \quad (5)$$

где ω_{em} — угловая частота испускаемого электромагнитного излучения; I_g — ширина запрещенной энергетической зоны нелегированного полупроводника, $U_{-1,+1}^{(da)} = -e^2/4\pi\epsilon_r\epsilon_0 d_{im}$ — энергия кулоновского взаимодействия иона акцептора и иона донора, находящихся на расстоянии d_{im} .

На рисунке 1 показаны результаты расчета по формуле (5) положения максимума линии бесфононной DA-фотолюминесценции в кристаллах p -Ge:Ga,As и n -Ge:As,Ga, полученных путем нейтронного-трансмутационного легирования с последующим отжигом радиационных дефектов. Результаты расчета по формуле (5) количественно согласуются с известными экспериментальными данными.



Точки — экспериментальные данные при температуре жидкого гелия, **линии** — расчет по формуле (5) для $N_d = 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в n -Ge:As,Ga и при $K = N_d/N_a = 0,4$ в p -Ge:Ga,As

Рисунок 1 – Зависимость энергии фотона $\hbar\omega_{em}$, испускаемого в актах DA-рекомбинации, от степени компенсации доноров акцепторами $K = N_a/N_d$ в кристаллах n -Ge:As (а) и от концентрации акцепторов N_a в p -Ge:Ga (б)

В разделе 4.2 развита модель стационарной прыжковой фотопроводимости однородно разупорядоченного полупроводника с точечными дефектами с концентрацией N_t , которые могут находиться в трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$. Полагается, что дефекты случайно распределены по кристаллу и прыжки одиночных электронов происходят только между дефектами в зарядовых состояниях (-1) , (0) и (0) , $(+1)$. При межцентровой подсветке происходит генерация неравновесных зарядовых состояний (-1) и $(+1)$ дефектов вследствие фотостимулированных переходов электронов между парами дефектов в зарядовых состояниях (0) . При рекомбинации неравновесных зарядовых состояний (-1) и $(+1)$ дефектов происходит образование пар дефектов в зарядовых состояниях (0) . Проведены расчеты для компенсации трехзарядных дефектов мелкими водородоподобными донорами и акцепторами с концентрациями N_d и N_a и степенями компенсации $K_d = N_d/N_t$ и $K_a = N_a/N_t$. Результаты расчета отношения прыжковой фотопроводимости к темновой электропроводности $\sigma_h(\gamma)/\sigma_h$ в зависимости от отношения γ/α коэффициентов фотоионизации (γ) и «захвата» (α) для $K_d = 0,25; 0,5; 0,75$ и $K_a = 0$ при $T = 300$ К показывают, что с увеличением интенсивности подсветки фотопроводимость $\sigma_h(\gamma)$ увеличивается и затем уменьшается из-за переходов зарядовых состояний $2(0) \rightarrow (-1) + (+1)$. Предсказано, что при $\gamma > \alpha$ наблюдается отрицательная прыжковая фотопроводимость, обусловленная уменьшением концентрации прыгающих между дефектами электронов при увеличении интенсивности подсветки. Для $N_t \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $K_d = 0,25; 0,5; 0,75$ и $K_a = 0$ при $T = 300$ К рассчитанное значение величины σ_h составляет $\approx 0,35, 0,33, 0,22 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ соответственно, что близко по величине к экспериментальным данным.

В разделе 4.3 разработаны электрическая и структурная схемы конденсатора на основе слоя аморфного гидрогенизированного кремния ($a\text{-Si:H}$) толщиной 3 мкм, отделенного от металлических обкладок диэлектрическими слоями из диоксида кремния (SiO_2) толщиной 0,3 мкм. Рассмотрены комнатные температуры ($T \approx 300$ К), при которых в отсутствие подсветки в слое $a\text{-Si:H}$ наблюдаются прыжки электронов между точечными дефектами структуры. При мало-сигнальном режиме измерения рассчитаны зависимости действительной C_1 и мнимой C_2 частей комплексной электрической емкости $\underline{C} = C_1 + iC_2$ (здесь $i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица) от частоты $f = 2\pi\omega$ синусоидального измерительного сигнала, а также угол сдвига фаз θ между током и напряжением. Расчеты величин C_1, C_2 для слоя $a\text{-Si:H}$ со стационарной прыжковой электропроводностью $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-10} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ и величины θ для $\sigma_{dc} \approx 1 \cdot 10^{-11}; 1 \cdot 10^{-10}; 1 \cdot 10^{-9} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ проведены при частотах f в диапазоне от 0,1 Гц до 300 Гц. Из расчетов следует, что величина C_1 уменьшается с увеличением частоты f , а величина C_2 отрицательна и немонотонно зависит от частоты f . Уменьшение величины C_1 при уве-

личении частоты f обусловлено уменьшением электрического сопротивления конденсатора. По этой же причине с увеличением частоты f емкость C_2 шунтируется прыжковой электропроводностью конденсатора. Угол сдвига фаз θ не монотонно зависит от частоты f в диапазоне от 0,1 Гц до 300 Гц, а максимум $\theta(f) \approx -65^\circ$ сдвигается в область высоких частот (от 1 Гц до 100 Гц) с увеличением электропроводности σ_{dc} слоя a -Si:H на постоянном токе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1) В квазиклассическом приближении квантовой механики разработана модель количественного описания электропроводности и коэффициента Холла на постоянном токе в ковалентных полупроводниках с водородоподобными примесями при равенстве вкладов в электропроводность от миграции электронов (или дырок) по разрешенным состояниям c -зоны (или v -зоны) и прыжковой миграции электронов по донорам (или дырок по акцепторам). Результаты расчета по формулам развитой модели количественно согласуются с известными экспериментальными данными для кристаллов p - и n -Ge, p - и n -Si [1–А].

2) Разработана модель «примесной решетки» в кристаллической матрице для расчета слабо зависящей от температуры туннельной электропроводности на постоянном токе в сильно легированных умеренно компенсированных полупроводниках в окрестности фазового перехода изолятор–металл. Показано, что для умеренно компенсированных ($0,15 < K < 0,85$) полупроводников в полосе примесной зоны в окрестности уровня Ферми происходит миграция носителей заряда между ближайшими по расстоянию разноименно заряженными основными примесями. Сравнение результатов расчетов по формулам разработанной модели с экспериментальными данными для кристаллов n -Ge:As, p -Ge:Ga, p -Dia:B, n -Si:P, n -ZnSe:Al, n -GaAs:Ge, n -GaAs:Sn, n -InSb и n -InP в целом показывает их количественное согласие. В области низких температур эти данные экспериментов ранее не поддавались количественному описанию [3–А].

3) Развита модель количественного описания префактора σ_{03} и энергии термической активации ε_3 стационарной прыжковой электропроводности $\sigma_h = \sigma_{03} \exp(-\varepsilon_3/k_B T)$ по водородоподобным примесям в компенсированных полупроводниках n - и p -типа. При расчетах величин σ_{03} и ε_3 впервые учтено влияние тепловой и конфигурационной энтропии. На примере кристаллов p -Ge:Ga в рамках модели «нестехиометрической простой кубической примесной решетки» рассчитаны зависимости величин σ_{03} и ε_3 от концентрации атомов галлия и степени их компенсации донорами в пределах умеренного и сильного легирования и для умеренных степеней компенсации. Результаты расчетов величин σ_{03} и ε_3 по полученным формулам количественно согласуются с известными

экспериментальными данными [5–А].

4) Разработана электростатическая модель туннельной миграции носителей заряда вблизи порога туннельной подвижности по электронейтральным состояниям основных водородоподобных примесей. Показано, что формирование порога туннельной подвижности обусловлено: 1) образованием квазинепрерывного спектра разрешенных значений энергии вследствие объединения возбужденных состояний электрически нейтральных основных примесей; 2) образованием электрического диполя при термически активированном переходе электрона (или дырки) между двумя электрически нейтральными атомами основной примеси. Результаты расчетов концентрационных зависимостей величины ε_2 для слабо компенсированных ковалентных кристаллов p -Si:B, n -Si:P и n -Ge:Sb количественно согласуются с известными экспериментальными данными [3–А; 7–А].

5) Построена электростатическая модель для вычисления термической энергии активации прыжковой ε_3 -электропроводности между ближайшими по расстоянию водородоподобными основными примесями в слабо легированных и слабо компенсированных кристаллических полупроводниках. Показано, что величина ε_3 определяется работой по преодолению кулоновской блокады носителей заряда (дырочных вакансий на акцепторах в полупроводниках p -типа и электронных вакансий на донорах в полупроводниках n -типа), создаваемой полем компенсирующих примесей. Результаты расчета значений величины ε_3 по построенной модели для объемных кристаллов германия и кремния p - и n -типа согласуются с известными экспериментальными данными [5–А; 8–А; 11–А].

6) Получена формула для расчета концентрационных зависимостей спектрального положения максимума линии бесфононной донорно-акцепторной фотолюминесценции при межзонном (краевом) возбуждении в ковалентных полупроводниках с водородоподобными примесями с учетом электростатических флуктуаций потенциальной энергии ионов примесей при низких температурах и низких уровнях стационарного межзонного фотовозбуждения. Показано, что акт бесфононной излучательной донорно-акцепторной рекомбинации происходит между неравновесным носителем заряда (электроном или дыркой) с первого возбужденного состояния атома неосновной примеси и неравновесным носителем заряда атома основной примеси с уровнем энергии, совпадающим с уровнем Ферми в примесной зоне. Результаты расчета на примере кристаллов германия p - и n -типа количественно согласуются с известными экспериментальными данными [4–А; 10–А].

7) Развита модель прыжковой фотопроводимости по трехзарядным ($-1, 0, +1$) собственным точечным дефектам кристаллической матрицы в однородно разупорядоченных полупроводниках. Показано, что положительная прыжковая фотопроводимость возрастает с увеличением интенсивности межцентровой под-

светки, когда коэффициент фотоионизации γ нейтральных дефектов меньше коэффициента α «захвата» электрона с отрицательно заряженного дефекта на положительно заряженный. Предсказана отрицательная фотопроводимость при $\gamma > \alpha$ из-за уменьшения концентрации нейтральных дефектов [2–А].

8) Разработаны структурная и электрическая схемы конденсатора с рабочим веществом «изолятор – аморфный гидрогенизированный кремний – изолятор». Слой аморфного гидрогенизированного кремния (a -Si:H) толщиной 3 мкм отделен от металлических обкладок конденсатора диэлектрическими прослойками из диоксида кремния (SiO_2) толщиной 0,3 мкм. Показано, что при комнатной температуре в отсутствие подсветки для диапазона частот 0,1 Гц – 300 Гц действительная часть емкости конденсатора уменьшается с увеличением частоты синусоидального измерительного сигнала, а мнимая часть отрицательна и не монотонно зависит от частоты. Также показано, что минимальное абсолютное значение угла сдвига фаз ($\approx 65^\circ$) смещается в область высоких частот (от 1 Гц до 100 Гц) с увеличением электропроводности слоя a -Si:H [6–А; 9–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1) Результаты исследования стационарной туннельной электропроводности по водородоподобным примесям в сильно легированных компенсированных полупроводниках, бесфононной донорно-акцепторной фотолюминесценции в кристаллах германия и прыжковой фотопроводимости по трехзарядным точечным дефектам в однородно разупорядоченных полупроводниках внедрены в образовательный процесс на кафедре физики полупроводников и наноэлектроники, кафедре физики твердого тела и нанотехнологий и кафедре физической оптики и прикладной информатики физического факультета БГУ (имеется 4 акта о внедрении).

2) Результаты расчетов значений величин энергий термической активации ε_2 - и ε_3 -электропроводностей, а также префактора прыжковой электропроводности могут быть использованы для оценки качества полупроводниковых материалов при проектировании элементов приборных структур.

3) Модель прыжковой фотопроводимости электронов между трехзарядными ($-1, 0, +1$) точечными дефектами в однородно разупорядоченных полупроводниках может использоваться при разработке радиационно-стойких терморезисторов и инфракрасных фотодетекторов для работы в области криогенных температур.

4) Структурная и электрическая схемы конденсатора на основе слоя a -Si:H (аморфного гидрогенизированного кремния) толщиной 3 мкм, отделенного от металлических обкладок диэлектрическими прослойками из SiO_2 (диоксида кремния) толщиной 0,3 мкм могут найти применение в электрических цепях регистрации низкочастотных сигналов для целей биомедицины.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных журналах в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1—А. Максимальная прыжковая электропроводность на постоянном токе по водородоподобным примесям в полупроводниках / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, И.И. Аникеев, А.Г. Забродский // Физика и техника полупроводников. – 2022. – Т. 56, вып. 11. – С. 1046–1054.

2—А. Poklonski, N.A. DC hopping photoconductivity via three-charge-state point defects in partially disordered semiconductors / N.A. Poklonski, I.I. Anikeev, S.A. Vyrko // Phys. Scr. – 2023. – Vol. 98, № 1. – P. 015823 (1–11).

3—А. Model of DC tunneling conductivity via hydrogen-like impurities in heavily doped compensated semiconductors / N.A. Poklonski, I.I. Anikeev, S.A. Vyrko, A.G. Zabrodskii // Phys. Status Solidi B. – 2023. – Vol. 260, № 4. – P. 2200559 (1–9).

4—А. Поклонский, Н.А. Решеточная модель бесфононной донорно-акцепторной фотолюминесценции в кристаллах германия / Н.А. Поклонский, И.И. Аникеев, С.А. Вырко // Журнал прикладной спектроскопии. – 2023. – Т. 90, № 5. – С. 676–683.

5—А. Аналитическое описание прыжковой электропроводности компенсированных полупроводников и расчеты на примере p -Ge:Ga / Н.А. Поклонский, И.И. Аникеев, С.А. Вырко, А.Г. Забродский // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94, вып. 6. – С. 838–848.

6—А. Поклонский, Н.А. Низкочастотный конденсатор с прыжковой электропроводностью рабочего вещества (на примере a -Si:H) / Н.А. Поклонский, И.И. Аникеев, С.А. Вырко // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 153–161.

7—А. Calculation of the activation energy of electrical ε_2 -conductivity of weakly compensated semiconductors / N.A. Poklonski, I.I. Anikeev, S.A. Vyrko, A.G. Zabrodskii // Phys. Status Solidi B. – 2024. – P. 2400178 (1–12). – URL: <https://doi.org/10.1002/pssb.202400178> (date of access: 28.07.2024).

8—А. Activation energy of DC hopping conductivity of lightly doped weakly compensated crystalline semiconductors / N.A. Poklonski, I.I. Anikeev, S.A. Vyrko, A.G. Zabrodskii // Phys. Status Solidi B. – 2024. – P. 2400132 (1–10). – URL: <https://doi.org/10.1002/pssb.202400132> (date of access: 08.08.2024).

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9—А. Поклонский, Н.А. Дипольный момент электрического конденсатора с рабочим веществом «изолятор – собственный полупроводник – изолятор» / Н.А. Поклонский, И.И. Аникеев, С.А. Вырко // Материалы и структуры современной электроники: матер. X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 окт.

2022 г. / БГУ ; редкол.: В.Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 174–180.

10–А. Поклонский, Н.А. Модель донорно-акцепторной фотолюминесценции в кристаллах германия при низких температурах / Н.А. Поклонский, И.И. Анিকেев, С.А. Вырко // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: матер. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 18–19 мая 2023 г. / НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ ; редкол.: Ю.И. Дудчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 354–356.

Тезисы докладов на конференциях

11–А. Поклонский, Н.А. Электростатическая модель энергии активации прыжковой электропроводности слабо легированного и слабо компенсированного кремния *p*-типа / Н.А. Поклонский, И.И. Анিকেев, С.А. Вырко // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. тез. X Междунар. науч. конф., Минск, 22–26 мая 2023 г. / ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» ; редкол.: В.М. Федосюк (пред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 472.



РЕЗЮМЕ

Аникеев Илья Иванович

МИГРАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК ПО ТОЧЕЧНЫМ ДЕФЕКТАМ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ЭЛЕМЕНТАХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ

Ключевые слова: легированные полупроводники, термическая энергия активации, электропроводность на постоянном токе, зонный и прыжковый режимы миграции, туннельная электрическая проводимость, донорно-акцепторная рекомбинация, прыжковая фотопроводимость, низкочастотный конденсатор.

Цель работы — аналитическое и численное описание электропроводности, термической энергии активации водородоподобных примесей, прыжковой фотопроводимости, донорно-акцепторной рекомбинации, емкости и сдвига фаз в легированных компенсированных полупроводниках и элементах приборных структур.

Методы исследования и использованная аппаратура: квазиклассическое приближение квантовой механики, статистическая физика точечных дефектов, электронов и дырок, численное дифференцирование и интегрирование.

Полученные результаты и их новизна: 1) рассчитаны электропроводность и коэффициент Холла на постоянном токе в ковалентных полупроводниках при температуре перехода от зонной к прыжковой электропроводности; 2) получена формула для расчета слабо зависящего от температуры стационарного туннельного электрического сопротивления в сильно легированных умеренно компенсированных кристаллических полупроводниках; 3) количественно описана стационарная прыжковая электропроводность по ближайшим водородоподобным примесям и рассчитаны величины ее префактора и энергии термической активации в кристаллах $p\text{-Ge:Ga}$; 4) разработана модель ε_2 -проводимости для расчета величины энергии термической активации ε_2 в умеренно и сильно легированных слабо компенсированных полупроводниках; 5) развита модель кулоновской блокады для расчета энергии активации ε_3 -проводимости слабо легированных и слабо компенсированных полупроводников; 6) дано аналитическое выражение для расчета положения максимума бесфононной линии донорно-акцепторной фотолюминесценции в кристаллических ковалентных полупроводниках; 7) развита модель стационарной прыжковой фотопроводимости однородно разупорядоченных полупроводников с точечными трехзарядными дефектами; 8) разработаны структурная и электрическая схемы конденсатора с прыжковой электропроводностью рабочего вещества (на примере $a\text{-Si:H}$).

Рекомендации по использованию и область применения. Результаты могут использоваться в учебном процессе на физическом факультете БГУ для оценки качества полупроводниковых материалов и в биомедицинских целях.

РЭЗІЮМЭ

Анікееў Ілья Іванавіч

МІГРАЦЫЯ ЭЛЕКТРОНАЎ І ДЗІРАК ПА КРОПКАВЫМ ДЭФЕКТАМ У КАМПЕНСАВАНЫХ ПАЎПРАВADНІКАХ І ЭЛЕМЕНТАХ ПРЫЛАДАВЫХ СТРУКТУР НА ІХ АСНОВЕ

Ключавыя словы: легіраваныя паўправаднікі, тэрмічная энергія актывацыі, электраправоднасць на пастаянным току, зонны і скачковы рэжымы міграцыі, тунэльная электрычная праводнасць, донарна-акцэптарная рэкамбінацыя, скачковая фотаправоднасць, нізкачастотны кандэнсатар.

Мэта працы — аналітычнае і колькаснае апісанне электраправоднасці, тэрмічнай энергіі актывацыі вадародападобных дамешкаў, скачковай фотаправоднасці, донарна-акцэптарнай рэкамбінацыі, ёмістасці і зруху фаз у легіраваных кампенсаваных паўправадніках і элементах прыладавых структур.

Метады даследавання і скарыстаная апаратура: квазікласічнае набліжэнне квантавай механікі, статыстычная фізіка кропкавых дэфектаў, электронаў і дзірак, колькаснае дыферэнцыяванне і інтэграванне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: 1) разлічаны электраправоднасць і каэфіцыент Хола на пастаянным току ў кавалентных паўправадніках пры тэмпературы пераходу ад зоннай да скачковай электраправоднасці; 2) атрымана формула для разліку слаба залежнага ад тэмпературы стацыянарнага тунэльнага электрычнага супраціўлення ў моцна легіраваных умерана кампенсаваных крышталічных паўправадніках; 3) колькасна апісана стацыянарная скачковая электраправоднасць па бліжэйшым вадародападобным дамешкам і разлічаны яе велічыні прэфактара і энергіі тэрмічнай актывацыі ў крышталях $p\text{-Ge:Ga}$; 4) распрацавана мадэль ε_2 -электраправоднасці для разліку велічыні энергіі тэрмічнай актывацыі ε_2 ва ўмерана і моцна легіраваных слаба кампенсаваных паўправадніках; 5) развіта мадэль кулонаўскай блакады для разліку энергіі актывацыі ε_3 -электраправоднасці слаба легіраваных і слаба кампенсаваных паўправаднікоў; 6) дадзены аналітычны выраз для разліку становішча максімуму бесфаноннай лініі донарна-акцэптарнай фоталюмінесцэнцыі ў крышталічных кавалентных паўправадніках; 7) развіта мадэль стацыянарнай скачковай фотаправоднасці аднародна неўпарадкаваных паўправаднікоў з кропкавымі трохзараднымі дэфектамі; 8) распрацаваны структурная і электрычная схемы кандэнсатара са скачковай электраправоднасцю працоўнага рэчыва (на прыкладзе $a\text{-Si:H}$).

Рекамендацыі по выкарыстанні і галіны прымянення. Вынікі працы могуць выкарыстоўвацца ў адукацыйным працэсе на фізічным факультэце БДУ, для ацэнкі якасці паўправадніковых матэрыялаў і ў біямедыцынскіх мэтах.

SUMMARY

Anikeyeu Ilya Ivanovich

MIGRATION OF ELECTRONS AND HOLES VIA POINT DEFECTS IN COMPENSATED SEMICONDUCTORS AND ELEMENTS OF DEVICE STRUCTURES BASED ON THEM

Keywords: doped semiconductors, thermal activation energy, dc electrical conductivity, band and hopping migration regimes, tunneling electrical conductivity, donor-acceptor recombination, hopping photoconductivity, low-frequency capacitor.

The goal of this work: analytical and numerical description of the electrical conductivity, the thermal activation energy of hydrogen-like impurities, hopping photoconductivity, radiative donor-acceptor recombination, capacitance and phase shift in doped compensated semiconductors and devices.

Methods of the study and used equipment: quasi-classical approximation of quantum mechanics, statistical physics of point defects, electrons and holes, numerical differentiation and integration.

The obtained results and their novelty: 1) the electrical conductivity and Hall coefficient at direct current in covalent semiconductors at the transition temperature from the band to the hopping electrical conductivity have been calculated; 2) a formula has been obtained for calculating the weakly temperature-dependent stationary tunneling electrical resistance in heavily doped moderately compensated crystalline semiconductors; 3) the stationary hopping electrical conductivity via nearest hydrogen-like impurities has been quantitatively described and the values of its prefactor and the thermal activation energy in *p*-Ge:Ga crystals have been calculated; 4) a model of the electrical ε_2 -conductivity has been developed to calculate the thermal activation energy ε_2 in moderately and heavily doped weakly compensated semiconductors; 5) a model of the Coulomb blockade has been developed to calculate the activation energy of the electrical ε_3 -conductivity of lightly doped weakly compensated semiconductors; 6) an analytical expression for calculating the position of the maximum of the zero phonon line of donor-acceptor photoluminescence in crystalline covalent semiconductors has been given; 7) a model of the stationary hopping photoconductivity of a homogeneously disordered semiconductors with point three-charge-state defects has been developed; 8) a structural and electrical schemes of a capacitor with the hopping electrical conductivity of the working substance (on the example of *a*-Si:H) have been developed.

Recommendations for the use and application area. The results can be used in the educational process at the Faculty of Physics of BSU, for quality assessment of semiconductor materials and for biomedical purposes.



Подписано в печать 28.10.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 80 экз. Заказ 252.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика
в республиканском унитарном предприятии
«Издательский центр Белорусского государственного университета».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.