

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 517.958:537.311.1; 621.315.592

КОВАЛЕВ
Александр Игоревич

**ДРЕЙФ И ДИФФУЗИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ТРЕХЗАРЯДНЫМ
ТОЧЕЧНЫМ ДЕФЕКТАМ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
КРИСТАЛЛАХ И ДИОДАХ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

МИНСК, 2018

Работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель – **Поклонский Николай Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики полупроводников и
наноэлектроники Белорусского государственного
университета.

Официальные оппоненты: **Абрамов Игорь Иванович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры микро- и наноэлектроники
УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»;
Бумай Юрий Александрович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры «Экспериментальная и теорети-
ческая физика» Белорусского национального тех-
нического университета.

Оппонирующая организация – Государственное научно-производственное объ-
единение «Научно-практический центр Нацио-
нальной академии наук Беларуси по материалो-
ведению».

Защита состоится **21 декабря 2018 года** в **14.00** часов на заседании совета
по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном универси-
тете по адресу: *Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета),
ауд. 407.* Телефон ученого секретаря 209-54-25.
Почтовый адрес: *проспект Независимости 4, Минск, 220030.*

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Бело-
русского государственного университета.

Автореферат разослан «**20**» ноября 2018 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор физ.-мат. наук профессор



А.К. Федотов

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений исследования в физике и технике ковалентных полупроводниковых материалов является изучение прыжкового переноса электронов и дырок между неподвижными точечными дефектами кристаллической структуры. Это обусловлено необходимостью создания и совершенствования радиационно-стойких биполярных полупроводниковых приборов, функционирующих при низких температурах в космосе.

Прыжковая электропроводность в полупроводниковых материалах — явление направленной миграции электронов (или дырок) под действием внешнего электрического поля посредством их термически ассистированного туннелирования между точечными дефектами — центрами локализации¹⁾. В кристаллических ковалентных полупроводниках прыжковая миграция электронов, как правило, реализуется двумя способами: 1) по водородоподобным атомам примесей в двух зарядовых состояниях [(0,+1) для доноров |dn> и (0,-1) для акцепторов |ap>] с одним основным (невозбужденным) уровнем энергии в запрещенной энергетической зоне; 2) по точечным двухуровневым дефектам одного сорта (типа, вида) в трех зарядовых состояниях ($Z = -1, 0, +1$ в единицах элементарного заряда), иначе *t*-дефектам²⁾. Отметим, что атомы водородоподобной легирующей примеси проявляют трехзарядные двухуровневые состояния при увеличении их концентрации и приближении к концентрационному фазовому переходу изолятор—металл (переходу Мотта в пределе нулевой абсолютной температуры). Такие примеси обозначаются символом *D* (для доноров) и символом *A* (для акцепторов). Из-за прыжков электронов зарядовые состояния неподвижных дефектов мигрируют по кристаллу. В среднем время прыжка электрона между центрами локализации много меньше времени его локализации.

Для создания *t*-дефектов используют облучение полупроводников ионизирующим излучением (гамма-квантами, быстрыми электронами, протонами и др.). Преимуществом радиационного образования *t*-дефектов кристаллической структуры по сравнению с «металлургическим» легированием атомами примесей является возможность вводить устойчивые (в области температур функционирования полупроводниковых приборов) радиационные дефекты в большой концентрации. При этом в кристаллах алмаза, карбида кремния и кремния с увеличением флюенса радиации, т. е. при накоплении собственных радиацион-

¹⁾ Pollak, M. Hopping – past, present and future(?) / M. Pollak // Phys. Status Solidi B. – 2002. – Vol. 230, № 1. – P. 295–304.

²⁾ Поклонский, Н.А. Расчет электрической емкости самокомпенсированных полупроводников с межцентровыми прыжками одного и двух электронов (на примере кремния с радиационными дефектами) / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, А.Г. Забродский // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42, № 12. – С. 1420–1425.

ных дефектов (атомных вакансий, междоузельных атомов и их ассоциатов), уровень Ферми стабилизируется в нижней половине запрещенной зоны³⁾.

Обычно ионизационное равновесие, например между дырками v -зоны и водородоподобными акцепторами в полупроводниковых кристаллах p -типа, а также сосуществование зонного (по состояниям v -зоны) и прыжкового (по атомам акцепторной примеси) переноса дырок трактуют порознь⁴⁾. Однако, при температуре T_j , когда электрическая проводимость дырок v -зоны приблизительно равна прыжковой проводимости дырок по акцепторам на постоянном токе, необходимо совместное рассмотрение ионизационного равновесия и миграции дырок как по состояниям v -зоны, так и по состояниям акцепторов. Зонная электропроводность преобладает при $T > T_j$, а прыжковая — при $T < T_j$. Температура T_j определяется по формуле⁵⁾: $T_j \approx 0.73 e^2 (KN)^{1/3} / (4\pi \epsilon_r \epsilon_0 k_B)$, где e — элементарный заряд, $N = N_0 + N_{-1}$ — концентрация водородоподобных акцепторов в зарядовых состояниях (0) и (-1); $0 < K < 1$ — степень компенсации акцепторов донорами [все в зарядовом состоянии (+1)]; KN — концентрация доноров, $N_{-1} \approx KN$ — условие электронейтральности, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ — статическая диэлектрическая проницаемость кристалла, k_B — постоянная Больцмана.

Актуальность темы диссертационной работы определяется потребностью в исследовании прыжковой миграции электронов между точечными двухуровневыми трехзарядными дефектами кристаллической структуры в ковалентных полупроводниках и p - n -диодах, перспективных для интегрирования в низкотемпературные радиационно-стойкие элементы космической электроники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Исследования по теме диссертации выполнялись на кафедре физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета Белорусского государственного университета. Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. № 190, п. 6. Электроника и фотоника, п. 8. Многофункциональные материалы и технологии), а также приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы (Указ № 166

³⁾ Брудный, В.Н. Зарядовая нейтральность в полупроводниках: дефекты, границы раздела, поверхность / В.Н. Брудный // Изв. вузов. Физика. — 2013. — Т. 56, № 7. — С. 27–29.

⁴⁾ Rogalski, A. Progress in focal plane array technologies / A. Rogalski // Progr. Quant. Electron. — 2012. — Vol. 36, № 2–3. — P. 342–473.

⁵⁾ Transition temperature from band to hopping direct current conduction in crystalline semiconductors with hydrogen-like impurities: Heat versus Coulomb attraction / N.A. Poklonski [et al.] // J. Appl. Phys. — 2011. — Vol. 110, № 12. — P. 123702 (7 pp.)

Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 г.).

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных в рамках научно-исследовательских работ: 1) «Ионизационное равновесие в алмазе p -типа» (проект БРФФИ Ф12МВ-033, № гос. регистрации 20122666, срок выполнения 2012–2014 гг.); 2) «Кулоновская и спиновая дисторсия молекулярных структур» (проект БРФФИ Ф14МН-009, № гос. регистрации 20142923, срок выполнения 2014–2016 гг.); 3) «Модификация электрической и магнитной активности дефектов структуры синтетических алмазов при термобарических и радиационных воздействиях» (ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», № гос. регистрации 20142998, срок выполнения 2014–2015 гг.); 4) «Инженерия точечных кремниевых дефектов в CVD-алмазе для создания источников яркой люминесценции: формирование и свойства» (проект БРФФИ Ф15РМ-046, № гос. регистрации 20151079, срок выполнения 2015–2017 гг.); 5) «Радиационно-поврежденные и лазерно-модифицированные алмазы: оптические, электрические и парамагнитные свойства» (проект БРФФИ Ф17РМ-091, № гос. регистрации 20171240, срок выполнения 2017–2019 гг.); 6) «Исследовать миграцию электронов по точечным дефектам структуры в полупроводниках для разработки выпрямителя прыжкового тока и элемента Пельтье» (Подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов» ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», № гос. регистрации 20161885, срок выполнения 2016–2018 гг.).

Цель и задачи исследования

Цель работы состояла в аналитическом и численном исследовании ионизационного равновесия, электрической проводимости на постоянном токе и квазистатической емкости кристаллических полупроводниковых материалов и диодов с p - n -переходом, содержащих центры локализации (атомы примесей и t -дефекты), в условиях миграции электронов в c -зоне и дырок в v -зоне, а также прыжковой миграции электронов и дырок между центрами локализации.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**: 1) исследовать ионизационное равновесие в легированных бором алмазах p -типа в условиях сосуществования зонной и прыжковой миграции дырок; 2) рассчитать концентрационное сужение щели Хаббарда между двумя уровнями энергии трехзарядных атомов основной (легирующей) примеси, т. е. между $D^0(A^0)$ - и $D^-(A^+)$ -зонами для доноров (D) и акцепторов (A) в слабо компенсированных кристаллах Si и Ge; 3) получить в аналитическом виде формулы для длины экранирования внешнего стационарного электрического поля и длины диффузии электронов в кристаллических полупроводниках с прыжковой миграцией электронов по t -дефектам; 4) разработать дрейфово-диффузионную

модель кремниевого p - n -диода с прыжковой миграцией электронов по t -дефектам через диод; 5) разработать теоретическую модель кремниевого диода, содержащего в плоском p - n -переходе δ -слой t -дефектов, с переносом дырок v -зоны в p -области и электронов c -зоны в n -области при учете их рекомбинации и генерации, а также прыжков электронов между t -дефектами.

Объект исследования — ковалентные полупроводники (алмаз, кремний, германий) и кремниевые p - n -диоды, содержащие как двухзарядные (водородоподобные) и трехзарядные атомы легирующих примесей, так и точечные трехзарядные дефекты кристаллической структуры (t -дефекты).

Предмет исследования — ионизационное равновесие в ковалентных полупроводниках; экранирование внешнего электрического поля, отношение коэффициента диффузии к дрейфовой подвижности при миграции дырок в v -зоне и электронов в c -зоне, а также при прыжковой миграции электронов и дырок по точечным дефектам; электрические параметры (вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики) кремниевых диодов с p - n -переходом как при прыжковой проводимости по t -дефектам, так и при зонной проводимости.

Выбор объекта и предмета исследования обусловлен, в частности, необходимостью создания радиационно-стойких кремниевых p - n -диодов для работы при низких температурах.

Научная новизна

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем: **1)** для легированных бором алмазов p -типа рассчитана концентрация дырок v -зоны и их подвижность в области температуры, при которой на постоянном токе зонная электропроводность дырок v -зоны примерно равна прыжковой электропроводности дырок между атомами бора (водородоподобными акцепторами; $|ap\rangle$); **2)** рассчитаны отношения коэффициента диффузии к дрейфовой подвижности как для дырок v -зоны, так и для дырок, прыгающих между атомами бора в алмазе; **3)** получена формула, связывающая ширину энергетической щели между зонами Хаббарда с концентрацией легирующей примеси (трехзарядных A -акцепторов или D -доноров) и степенью ее компенсации; **4)** в аналитическом виде получены выражения для длины экранирования стационарного электрического поля и длины диффузии прыгающих по t -дефектам [точечным двухуровневым дефектам в трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$] как одиночных электронов, так и пар электронов; **5)** построена модель кремниевого p - n -диода, содержащего равномерно распределенные t -дефекты, для которой составлена и численно решена стационарная система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая прыжковую миграцию электронов по дефектам через диод; **6)** построена модель кремниевого p - n -диода, со-

держашего в области p - n -перехода узкий слой t -дефектов. Для описания зонной проводимости в таком диоде составлена и численно решена система нелинейных дифференциальных уравнений, учитывающая генерационно-рекомбинационные процессы с участием t -дефектов.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель ионизационного равновесия в кристаллах алмаза p -типа между дырками v -зоны и водородоподобными акцепторами [атомами бора в зарядовых состояниях (0) и (-1)] и расчет в квазиклассическом приближении отношения коэффициента диффузии к дрейфовой подвижности как для дырок v -зоны, так и для прыгающих по атомам бора дырок, которые показывают, что возрастание электростатических флуктуаций потенциальной энергии дырок вследствие легирования алмаза бором приводит к увеличению величины отношения их коэффициента диффузии к дрейфовой подвижности.

2. В кристаллических ковалентных полупроводниках, содержащих точечные t -дефекты в трех зарядовых состояниях (-1, 0, +1), длина экранирования внешнего стационарного электрического поля определяется концентрациями прыгающих между t -дефектами одиночных электронов, а щель между двумя уровнями энергии трехзарядных D -доноров (или A -акцепторов) при увеличении их концентрации уменьшается из-за формирования возбужденными состояниями электрически нейтральных примесей квазинепрерывной зоны разрешенных значений энергии для электронов c -зоны (или дырок v -зоны).

3. Модель кремниевого p - n -диода с равномерно распределенными t -дефектами и результаты расчета в дрейфово-диффузионном приближении статических электрических параметров диода в условиях доминирования стационарного прыжкового тока электронов по t -дефектам над токами электронов c -зоны в n -области и дырок v -зоны в p -области, предсказывающие асимметрию зависимости величины прыжкового тока через диод от полярности приложенного электрического напряжения.

4. Модель кремниевого p - n -диода, содержащего δ -слой t -дефектов в области плоского p - n -перехода, и результаты расчета статических вольт-амперной и вольт-фарадной характеристик диода при зонной миграции электронов в n -области и дырок в p -области, показывающие, что различие темпов генерационно-рекомбинационных процессов для электронов c -зоны и дырок v -зоны в δ -слое приводит к появлению области насыщения прямого тока и к немонотонному изменению емкости при обратном напряжении смещения.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертации основные результаты и выводы получены лично соискателем. Научный руководитель, доктор физико-математических наук

Н.А. Поклонский, сформулировал задачи и направления исследования, участвовал в обсуждении и представлении полученных результатов для печати. Кандидаты физико-математических наук С.А. Вырко и А.Т. Власов участвовали в обсуждении методов аналитических и численных расчетов и их результатов, а кандидаты физико-математических наук Н.И. Горбачук и С.В. Шпаковский оказывали помощь при выборе оптимальных параметров кремниевых диодов. Результаты исследований других соавторов не включены в работу.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: 5-я Международная научная конференция «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, 2012); 9-я Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, 2014); Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, 2016); 7-я Международная научная конференция «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, 2016).

Результаты диссертации внедрены в учебный процесс на кафедре физики полупроводников и наноэлектроники БГУ и используются в процессе разработки серии радиационно-стойких биполярных транзисторов в рамках выполнения работ ГНТП «Микроэлектроника» на ОАО «Интеграл». Имеется 4 акта о практическом использовании.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 13 научных работах: 9 статей в рецензируемых научных журналах в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 6 авторских листов) и 4 статьи в сборниках материалов научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 123 страницы, в том числе 25 рисунков занимают 11 страниц, 2 приложения — 5 страниц. Библиографический список содержит 213 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 содержит аналитический обзор литературы по тематике исследования. В этой главе обсуждается процесс формирования точечных t -дефектов кристаллической структуры. Здесь также рассматривается стационарная элек-

трическая проводимость полупроводниковых материалов, а именно общая схема температурной зависимости логарифма удельного электрического сопротивления от обратной температуры $1/T$ для ковалентных полупроводников, легированных атомами примесей, которые проявляют двухзарядные (водородоподобные) и трехзарядные состояния.

В главе 2 развита квазиклассическая модель ионизационного равновесия в алмазе p -типа между водородоподобными акцепторами (атомами бора, замещающими в узлах кристаллической решетки атомы углерода) и дырками v -зоны в окрестности температуры T_j перехода от зонной к прыжковой электрической проводимости на постоянном токе.

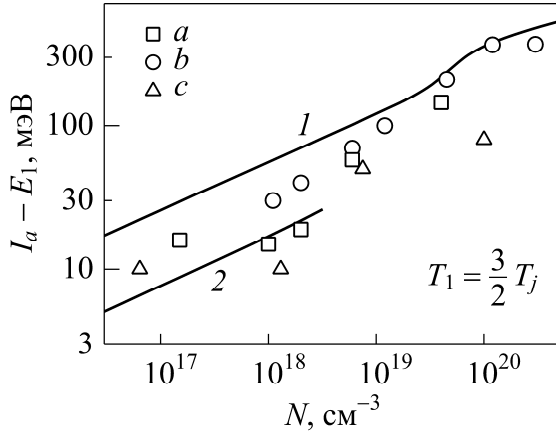
В разделе 2.1 описывается статистика дырок и зарядовых состояний водородоподобных акцепторов (атомов бора) в кристаллах алмаза p -типа. Плотность пространственного распределения атомов примесей (акцепторов и доноров), а также дырок по кристаллу считается пуассоновской, а флуктуации их электростатической потенциальной энергии — гауссовыми. Рассчитаны зависимости температуры T_j от концентрации атомов бора $N = N_0 + N_{-1}$ в зарядовых состояниях (0) и (-1) при концентрации доноров KN [все доноры в зарядовом состоянии (+1)]. Развита модель ионизационного равновесия учитывает уменьшение энергии термической ионизации атомов бора при увеличении их концентрации, а также электростатические флуктуации, обусловленные кулоновским взаимодействием только двух ближайших по расстоянию точечных зарядов (ионов примесей и дырок). Для температуры T_j проведено вычисление концентрации дырок v -зоны и их дрейфовой скачковой (эстафетной, турбулентной) подвижности при непрерывном рассеянии на атомах бора [непрерывные эстафетные переходы локализация – делокализация: (0) \rightarrow (-1)].

Сравнение расчетных и экспериментальных (взятых из научной литературы) зависимостей дифференциальной энергии термической ионизации атомов бора E_1 (для температуры $\approx 3T_j/2$) от их концентрации N в алмазах p -типа приведено на рисунке 1. Энергетический порог дрейфовой миграции для дырок v -зоны E_{mb} принят равным сумме пороговой энергии для диффузионного протекания E_{per} и обменной энергии E_{exc} дырок v -зоны. Если энергия дырки E_p меньше пороговой энергии для дрейфовой миграции, то дырка может двигаться только в ограниченной области трехмерного кристаллического образца.

В разделе 2.2 даны оценки экстраполированной в область температур T_j дрейфовой прыжковой подвижности дырок $M_h(T_j)$, т. е. дырок, прыгающих между атомами бора (как акцепторами) в зарядовых состояниях (0) и (-1):

$$M_h(T_j) \approx \mu_j p_{mb} N_{0,-1}, \quad (1)$$

где p_{mb} — концентрация делокализованных дырок v -зоны, $N_{0,-1} = N_0 N_{-1} / N$ — концентрация прыгающих по атомам бора дырок; $\mu_j = \mu_p(T_j)$ — дрейфовая скач-



Линии — расчет E_1 для степеней компенсации: 1 — $K = 0.15$; 2 — $K = 0.5$; точки a, b, c — данные из научной литературы; $I_a = 370$ мэВ — энергия ионизации одиночного атома бора
Рисунок 1. — Зависимость термической энергии ионизации атомов бора E_1 для температуры $T_1 \approx 3T_j/2$ от их концентрации N в кристаллах алмаза

ковая (эстафетная, турбулентная) подвижность дырок v -зоны при условии их непрерывного рассеяния на ионах бора для температуры T_j .

Отношения коэффициента диффузии к дрейфовой подвижности для дырок v -зоны (D_p/μ_p) и для прыгающих между атомами бора дырок (D_h/M_h) представлены в виде:

$$D_p/\mu_p = \xi_p k_B T/e, \quad D_h/M_h = \xi_h k_B T/e, \quad (2)$$

где $\xi_p \geq 1$, $\xi_h \geq 1$ — безразмерные параметры в форме определенных интегралов. Аналитически и численно установлено, что ξ_p и ξ_h увеличиваются при увеличении среднеквадратичных значений электростатических флуктуаций потенциальной энергии дырок (в v -зоне и на акцепторах), обусловленных кулоновским взаимодействием ближайших по

расстоянию точечных зарядов (ионизированных акцепторов, доноров и дырок). Расчет по соотношениям (2) показывает, что при увеличении концентрации бора возрастают как электростатические флуктуации, так и отношения коэффициентов диффузии дырок D_p и D_h к их дрейфовым подвижностям μ_p и M_h .

Рассчитанная для температуры $T_3 \approx T_j/3$ зависимость термической энергии активации прыжковой электропроводности ε_3 от концентрации N атомов бора в умеренно компенсированных ($0.1 < K < 0.5$) алмазах p -типа согласуется с известными экспериментальными данными.

В главе 3 в квазиклассическом приближении разработана модель концентрационного сужения энергетической щели Хаббарда в слабо компенсированных полупроводниках, учитывающая возбужденные состояния основных примесей в зарядовых состояниях (0). Модель позволяет аналитически и численно рассчитать уменьшение ширины энергетической щели между акцепторными зонами A^0 и A^+ в дырочном полупроводнике или донорными зонами D^0 и D^- в электронном полупроводнике при увеличении концентрации примесей.

В разделе 3.1 рассматривается ионизационное равновесие между A^0 - и A^+ -зонами A -акцепторов с концентрацией $N_A = N_{+1} + N_0 + N_{-1}$ в зарядовых состояниях (+1, 0, -1), а также между D^0 - и D^- -зонами D -доноров с концентрацией $N_D = N_{-1} + N_0 + N_{+1}$ в зарядовых состояниях (-1, 0, +1).

Показано, что сужение щели Хаббарда происходит вследствие формирования из возбужденных состояний электрически нейтральных A -акцепторов (или

D -доноров) квазинепрерывной зоны разрешенных значений энергии для дырок (или электронов). Эта квазинепрерывная зона сливается с потолком v -зоны для A -акцепторов (с дном c -зоны для D -доноров), т. е. потолок v -зоны E_v для полупроводника p -типа (дно c -зоны E_c для полупроводника n -типа) «смещается» в глубь запрещенной энергетической зоны на величину:

$$\delta E_{v(c)}/I_b = l_m^{-2} = 2a_H d_{im}^{-1} \approx 3.61 a_H [(1 + K_{d(a)}) N_{A(D)}]^{-1/3}, \quad (3)$$

где $I_b > 0$ — энергия, необходимая для перехода дырки с уединенного A -акцептора в зарядовом состоянии (0) в v -зону (электрона с D -донора в c -зону), $a_H = e^2/(8\pi\epsilon_r\epsilon_0 I_b)$ — боровский радиус; $l_m = [(d_{im}/2)/a_H]^{1/2} \geq 1$ — наибольшее число возможных возбужденных состояний среднестатистического A -акцептора (D -донора) в зарядовом состоянии (0); $d_{im} \approx 0.554[(1 + K_{d(a)}) N_{A(D)}]^{-1/3}$ — среднее расстояние между ближайшими атомами примесей при их случайном распределении в кристалле; $K_d N_A$ — концентрация $|dn\rangle$ -доноров [все в зарядовом состоянии (+1)], которые компенсируют A -акцепторы в полупроводнике p -типа, $K_a N_D$ — концентрация $|ap\rangle$ -акцепторов [все в зарядовом состоянии (-1)], которые компенсируют D -доноры в полупроводнике n -типа; $0 < K_{a(d)} < 1$.

Величина $\delta E_{v(c)}$ определяется максимальным радиусом боровской орбиты возбужденного состояния электрически нейтрального атома основной примеси, не превышающим половины среднего расстояния между ближайшими примесями. Например, для полупроводника p -типа получаем:

$$E_b = I_b - \delta E_v = (1 - l_m^{-2}) I_b, \quad E_t = 0.055 E_b = (1 - l_m^{-2}) I_t, \quad (4)$$

где $I_t > 0$ — энергия, необходимая для перехода дырки с уединенного A -акцептора в зарядовом состоянии (+1) в v -зону.

Из (4) находим ширину щели между двумя уровнями энергии (A^0 - и A^+ -зонами) A -акцепторов (или D^0 - и D^- -зонами D -доноров):

$$(E_b - E_t)_{A(D)} = (1 - l_m^{-2}) I_2 \geq 0, \quad (5)$$

где $I_2 = I_b - I_t = 0.995 I_b = 0.995 e^2/(8\pi\epsilon_r\epsilon_0 a_H)$.

В разделе 3.2 выведены аналитические формулы, описывающие дифференциальную термическую энергию активации $\epsilon_2 \approx (E_b - E_t)_{A(D)}$ прыжковых переходов дырок между A^0 -, A^+ -зонами для дырочного полупроводника (p -типа) и электронов между D^0 -, D^- -зонами для электронного полупроводника (n -типа). Также для дырочного и электронного полупроводников рассчитана температурная зависимость концентрации прыгающих дырок и электронов.

В главе 4 в дрейфово-диффузионном приближении рассматривается миграция как одиночных электронов, так и пар электронов (биполяронов) посредством их прыжков между неподвижными точечными дефектами в трех зарядовых состояниях (-1, 0, +1) при наложении на ковалентный кристаллический полупроводник внешнего электрического поля.

В разделе 4.1 получены аналитические выражения для длины экранирования стационарного электрического поля и длины диффузии электронов, прыгающих между t -дефектами. Зарядовые состояния (0) и (+1) формируют {1}-зону (точнее, разброс значений уровней энергии t -дефектов в запрещенной зоне кристалла), а зарядовые состояния (-1) и (0) — {2}-зону t -дефектов.

Для узких {1}- и {2}-зон энергии t -дефектов, когда их ширины W_1 и W_2 меньше тепловой энергии $k_B T$, т. е. когда безразмерный параметр $\xi_{Z,Z'}$, входящий в соотношение $D_{Z,Z'}/M_{Z,Z'} = \xi_{Z,Z'} k_B T / |Z - Z'| e$ (здесь $Z, Z' = -1, 0, +1$ — зарядовое состояние дефекта) равен единице ($\xi_{-1,0} = \xi_{0,+1} = \xi_{-1,+1} = 1$), длина экранирования внешнего стационарного электрического поля в полупроводнике Λ_s и длина прыжковой диффузии Λ_d определяются в виде:

$$\Lambda_s^{-2} = e^2 (N_{-1,0} + N_{0,+1} + 4N_{-1,+1}) / \epsilon_r \epsilon_0 k_B T, \\ \Lambda_d^{-2} = (\alpha N (N_{-1} + N_{+1}) / N_0) [(D_{-1,0} N_{-1,0} + D_{0,+1} N_{0,+1}) / D_{-1,0} D_{0,+1} (N_{-1,0} + N_{0,+1})], \quad (6)$$

где $N = N_0 + N_{-1} + N_{+1}$ — концентрация t -дефектов в трех зарядовых состояниях; $N_{-1,0} = N_{-1} N_0 / N$, $N_{0,+1} = N_0 N_{+1} / N$ и $N_{-1,+1} = N_{-1} N_{+1} / N$ — равновесные концентрации прыгающих между t -дефектами одиночных электронов; α — коэффициент «прыжкового захвата» одного электрона с t -дефекта в зарядовом состоянии (-1) на t -дефект в зарядовом состоянии (+1), в результате чего эти два дефекта переходят в зарядовое состояние (0); $D_{Z,Z'}/M_{Z,Z'}$ — отношение коэффициента диффузии к дрейфовой подвижности для прыгающих между t -дефектами электронов.

Для широких {1}- и {2}-зон энергии t -дефектов ($W_1 + W_2 > k_B T$ и $\xi_{Z,Z'} > 1$; $\xi_{-1,0} \neq \xi_{0,+1}$, $\xi_{0,+1} \neq \xi_{-1,+1}$) аналитически разделить длину экранирования Λ_s и длину прыжковой диффузии Λ_d подобно соотношениям (6) не удается.

В разделе 4.2 рассмотрена прыжковая миграция биполяронов (пар электронов с зарядом $-2e$) в кристаллических полупроводниках по неподвижным точечным s -дефектам в трех зарядовых состояниях (-1, 0, +1). В отличие от t -дефектов, s -дефекты имеют эффективную отрицательную энергию электронной корреляции и обращенное расположение уровней энергии в запрещенной зоне полупроводника. Прыжку одного биполярона соответствует переход двух электронов с одного s -дефекта в зарядовом состоянии (-1) на другой s -дефект в зарядовом состоянии (+1). Получена формула для длины экранирования внешнего стационарного электрического поля:

$$\Lambda_s = (\epsilon_r \epsilon_0 \xi_{-1,+1} k_B T / 4e^2 N_{-1,+1})^{1/2}, \quad (7)$$

где $\xi_{-1,+1} k_B T / 2e = D_{-1,+1} / M_{-1,+1}$ — отношение прыжкового коэффициента диффузии к дрейфовой прыжковой подвижности биполяронов; $N_{-1,+1} = N_{-1} N_{+1} / (N_{-1} + N_0 + N_{+1}) \equiv N_{-1} N_{+1} / N$ — концентрация прыгающих по s -дефектам биполяронов.

Длина экранирования по (7) определяется концентрацией прыгающих между дефектами пар электронов (биполяронов) с учетом того, что для s -дефектов

$N_0 \ll N_{-1} + N_{+1} \approx N$. При этом подвижные зарядовые состояния неподвижных дефектов, определяющих экранирование внешнего поля, удовлетворяют условию электрической нейтральности $N_{-1} = N_{+1} + K_d N$, где $K_d N$ — концентрация $|dn\rangle$ -доноров [все в зарядовом состоянии (+1)].

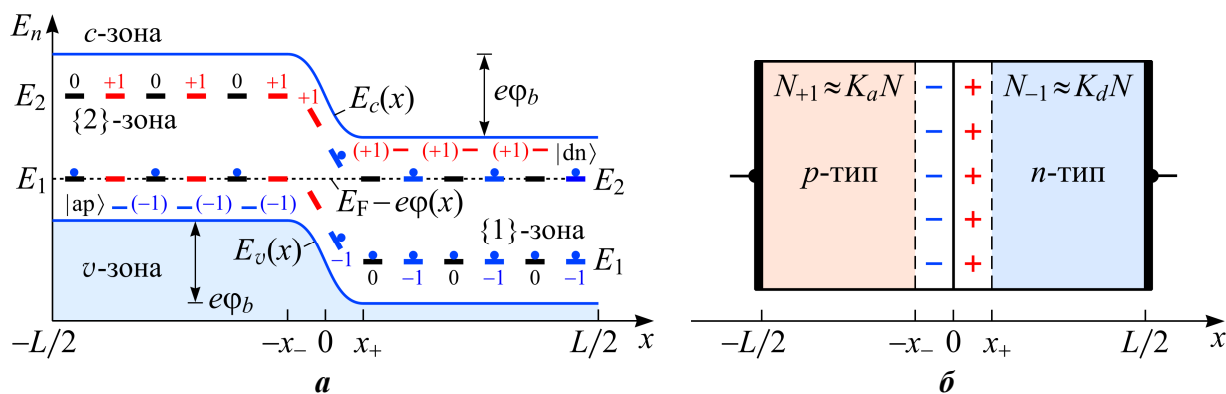
В главе 5 в дрейфово-диффузионном приближении построены две стационарные модели кремниевых диодов, одна из которых описывает прыжковую миграцию электронов через диод по t -дефектам, а вторая описывает зонную миграцию дырок и электронов в p - и n -областях диода с учетом генерационно-рекомбинационных процессов, происходящих в узком слое t -дефектов, сформированном в области p - n -перехода.

В разделе 5.1 построена модель кремниевого p - n -диода, с равномерно распределенными в диоде точечными t -дефектами одного сорта в трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$ с концентрацией $N = N_{-1} + N_0 + N_{+1}$. Каждый t -дефект вносит два уровня энергии в запрещенную энергетическую зону полупроводника. В таком диоде (далее ζ -диоде) перенос заряда осуществляется только посредством прыжков электронов между t -дефектами (рисунок 2).

Считается, что концентрации полностью ионизованных водородоподобных акцепторов и доноров распределены вдоль p - n -диода (вдоль координаты x) так:

$$N_a(x) = K_a N / [1 + \exp(x/l)], \quad N_d(x) = K_d N / [1 + \exp(-x/l)], \quad (8)$$

где параметры K_a , K_d и l определяют профиль легирования диода $|ap\rangle$ -акцепторами [все в зарядовом состоянии (-1)] и $|dn\rangle$ -донорами [все в зарядовом состоянии $(+1)$], x — координата.



E_n — энергия электрона; E_F — уровень Ферми при $x = -L/2$ относительно $E_v(x)$; $\phi(x)$ — электростатический потенциал; $e\phi_b > 0$ — энергетический барьер для дырок v -зоны и электронов c -зоны; $E_c(x)$ и $E_v(x)$ — зависимости краев c - и v -зон от координаты x

Рисунок 2. — Энергетическая зонная диаграмма (а) и схема (б) ζ -диода в состоянии термодинамического равновесия

В условиях термодинамического равновесия зарядовые состояния t -дефектов перераспределяются таким образом, чтобы компенсировать положительный заряд водородоподобных доноров $|dn\rangle$ и отрицательный заряд водородоподоб-

ных акцепторов $|ар\rangle$ вдали от области двойного электрического слоя по обе стороны металлургической границы ($x = 0$) p - n -перехода. При этом для $|x| \gg l$ выполняются условия электрической нейтральности в виде: $N_{+1} \approx K_a N$ — для области p -типа и $N_{-1} \approx K_d N$ — для области n -типа. Из этих условий определяется уровень Ферми E_F в соответствующих областях ζ -диода.

Если к находящемуся в термостате ζ -диоду от внешнего источника приложено стационарное электрическое напряжение U , то под его действием в диоде вдоль оси x возникает прыжковый ток плотностью $J_h = J_{0,+1}(x) + J_{-1,0}(x)$. В p -области прыжковый ток $J_{0,+1}$ обусловлен миграцией одиночных электронов между t -дефектами в зарядовых состояниях (0) и (+1), а в n -области прыжковый ток $J_{-1,0}$ обусловлен миграцией одиночных электронов между t -дефектами в зарядовых состояниях (-1) и (0).

В дрейфово-диффузионном приближении составлена и численно решена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая стационарную прыжковую миграцию электронов по t -дефектам в ζ -диоде:

$$J_{-1,0}(x) = eN_{-1,0}(x) \left[M_{-1,0}E(x) + D_{-1,0} \frac{d}{dx} \ln \frac{N_{-1}(x)}{N_0(x)} \right],$$

$$J_{0,+1}(x) = eN_{0,+1}(x) \left[M_{0,+1}E(x) + D_{0,+1} \frac{d}{dx} \ln \frac{N_0(x)}{N_{+1}(x)} \right],$$

$$\frac{dE(x)}{dx} = -\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{e}{\varepsilon_r \varepsilon_0} [N_{+1}(x) - N_{-1}(x) + N_d(x) - N_a(x)],$$

$$\frac{1}{e} \frac{dJ_{-1,0}(x)}{dx} = \alpha N_{-1}(x)N_{+1}(x) - \beta N_0^2(x), \quad \frac{1}{e} \frac{dJ_{0,+1}(x)}{dx} = -\alpha N_{-1}(x)N_{+1}(x) + \beta N_0^2(x), \quad (9)$$

где $N_{-1,0}(x) = N_{-1}(x)N_0(x)/N$ и $N_{0,+1}(x) = N_0(x)N_{+1}(x)/N$ — концентрации прыгающих между t -дефектами одиночных электронов [переходы $(-1) \rightarrow (0)$ и $(0) \rightarrow (+1)$]; $N = N_{-1}(x) + N_0(x) + N_{+1}(x) = \text{const}$ — концентрация равномерно распределенных t -дефектов; $E(x) = -d\varphi(x)/dx$ — напряженность электрического поля в диоде; $M_{-1,0}$ и $M_{0,+1}$ — дрейфовые прыжковые подвижности электронов; $D_{-1,0}$ и $D_{0,+1}$ — коэффициенты диффузии прыгающих электронов; α — коэффициент «прыжкового захвата» одного электрона с t -дефекта в зарядовом состоянии (-1) на t -дефект в зарядовом состоянии (+1), так что происходит их нейтрализация: $(-1) + (+1) \rightarrow 2(0)$; β — коэффициент тепловой ионизации двух электрически нейтральных t -дефектов [$2(0) \rightarrow (-1) + (+1)$]; $dJ_{-1,0}/dx + dJ_{0,+1}/dx = dJ_h/dx = 0$.

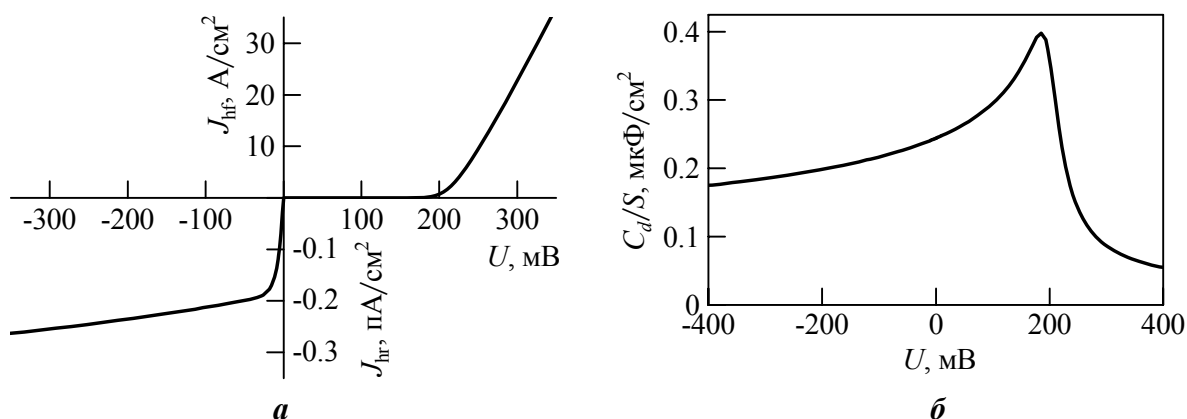
Граничные условия для системы (9) с учетом (8) записываются так:

$$N_{-1}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{K_d N}{1 + \exp(-L/2l)} - \frac{K_a N}{1 + \exp(L/2l)}, \quad N_{+1}\left(-\frac{L}{2}\right) = \frac{K_a N}{1 + \exp(-L/2l)} - \frac{K_d N}{1 + \exp(L/2l)},$$

$$\varphi(-L/2) = 0, \quad \varphi(L/2) = \varphi_b - U, \quad J_{-1,0}(-L/2) = 0, \quad J_{0,+1}(L/2) = 0, \quad (10)$$

где L — длина диода; ϕ_b — контактная разность потенциалов; U — электрическое напряжение, приложенное к электродам ζ -диода от внешнего источника.

Численное решение граничной задачи (9)–(10) позволяет рассчитывать распределение электрического потенциала, напряженности электрического поля и зарядовых состояний t -дефектов вдоль ζ -диода, а также его статическую вольт-амперную и вольт-фарадную характеристики (рисунок 3).



J_{hf} и J_{hr} — плотности прямого и обратного прыжковых токов, C_d/S — отношение электрической емкости C_d к площади S плоского p - n -перехода

Рисунок 3. – Статические вольт-амперная (а) и вольт-фарадная (б) характеристики кремниевого ζ -диода при температуре $T = 78$ К

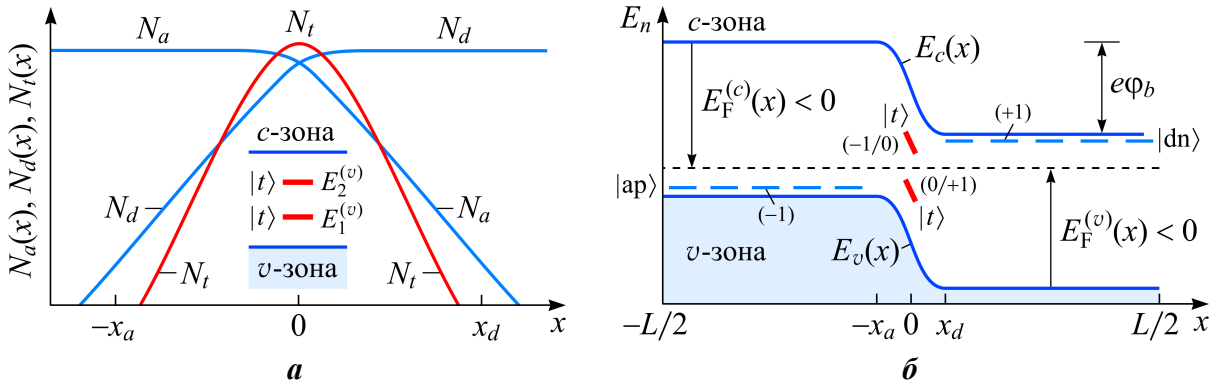
Из рисунка 3 видно, что для ζ -диода длиной $L = 3$ мкм с профилем легирования $l = 100$ нм, $K_a = K_d = 0.5$, диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 11.5\epsilon_0$ и концентрацией t -дефектов $N = 1 \cdot 10^{19}$ см⁻³ ($E_1 = 250$ мэВ, $E_2 = 550$ мэВ) проявляется асимметрия зависимости плотности прыжкового тока J_h и емкости C_d , относительно полярности прикладываемого к диоду напряжения смещения U ($U > 0$ — прямое смещение, $J_h = J_{hf} > 0$; $U < 0$ — обратное, $J_h = J_{hr} < 0$).

В разделе 5.2 построена модель кремниевого диода, содержащего в области p - n -перехода δ -слой t -дефектов, которые имеют нормальное (гауссово) распределение вдоль диода с максимумом в точке металлургического перехода ($x = 0$). Распределение по x водородоподобных $|ap\rangle$ -акцепторов и $|dn\rangle$ -доноров задавалось по формуле (8). Такой диод называется p - t - n -диодом (рисунок 4).

Для описания протекающих в p - t - n -диодe стационарных процессов в дрейфово-диффузионном приближении составлена и численно решена система нелинейных дифференциальных уравнений, учитывающая генерационно-рекомбинационные процессы на t -дефектах в δ -слое диода:

$$\begin{aligned} \frac{dn(x)}{dx} &= -en(x)E(x)/k_B T + J_n(x)/eD_n, & \frac{dp(x)}{dx} &= ep(x)E(x)/k_B T - J_p(x)/eD_p, \\ \frac{d\phi(x)}{dx} &= -E(x), & \frac{dE(x)}{dx} &= \frac{e}{\epsilon_r \epsilon_0} [p(x) + N_d(x) + N_{t,+1}(x) - n(x) - N_a(x) - N_{t,-1}(x)], \\ \frac{dJ_n(x)}{dx} &= -dJ_p(x)/dx = -e[G_p(t,+1) - R_p(t,0) + G_n(t,-1) - R_n(t,0) + \\ &+ G_{np} - R_{np} - G_{tt} - R_{tt}], \end{aligned} \quad (11)$$

где n и p — концентрации электронов и дырок, $N_{t,+1(t,-1)}$ — концентрация t -дефектов в зарядовом состоянии $+1$ (-1); $J_{n(p)}$ — плотность электронного (дырочного) тока, $D_{n(p)}/\mu_{n(p)} = k_B T/e$; $D_{n(p)}$ и $\mu_{n(p)}$ — коэффициент диффузии и дрейфовая подвижность электронов c -зоны (дырок v -зоны), $G_n(t, Z)$ и $G_p(t, Z)$ — скорость (темп) теплового выброса t -дефектами (в зарядовом состоянии Z) электронов в c -зону и дырок в v -зону (т. е. захвата электронов из v -зоны на t -дефекты), $R_n(t, Z)$ и $R_p(t, Z)$ — скорость захвата на t -дефекты (в зарядовом состоянии Z) электронов из c -зоны и дырок из v -зоны (т. е. выброса электронов t -дефектами в v -зону), G_{np} и R_{np} — скорость межзонной генерации и рекомбинации электронов c -зоны и дырок v -зоны, G_{tt} и R_{tt} — скорость перехода электронов в δ -слое между t -дефектами по схеме $[2(0) \rightarrow (-1) + (+1)]$ и $[(-1) + (+1) \rightarrow 2(0)]$ соответственно.



$E_F^{(v)}(x) = E_F^{(v)}(x = -L/2) - e\phi(x)$ — уровень Ферми, отсчитанный относительно $E_v(x)$;
 $|E_F^{(v)}(x) + E_F^{(c)}(x)| = E_g$ — ширина запрещенной энергетической зоны

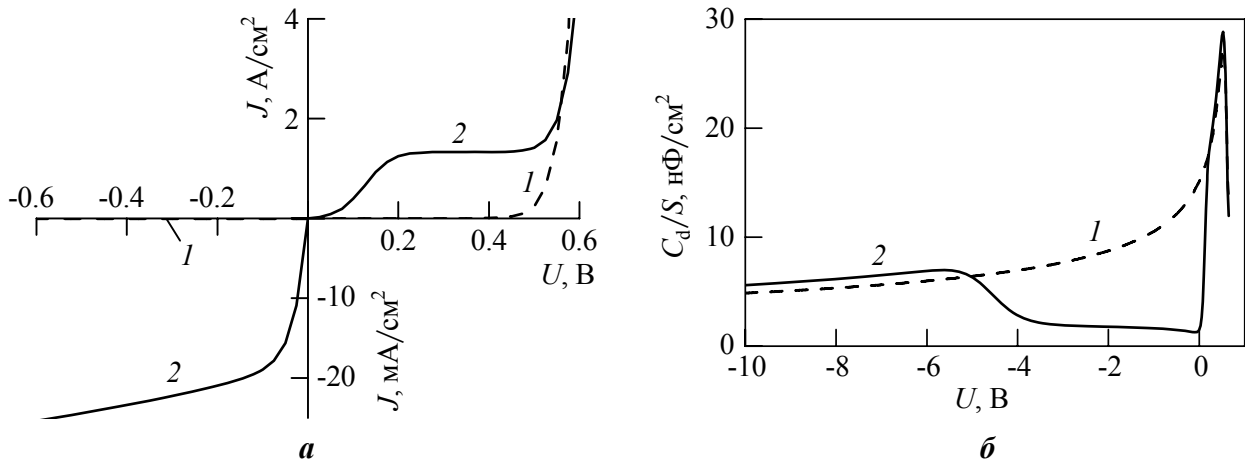
Рисунок 4. — а) схема зависимости от координаты x концентрации $N_a(x)$ водородоподобных акцепторов $|ap\rangle$, концентрации $N_d(x)$ доноров $|dn\rangle$ и концентрации $N_t(x)$ t -дефектов $|t\rangle$ с уровнями энергии $E_2^{(v)} > E_1^{(v)}$ относительно потолка v -зоны $E_v(x)$ кристаллического кремния; б) зонная диаграмма p - t - n -диода в равновесии

Статические электрические параметры p - t - n -диода (вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики) получались из решения системы дифференциальных уравнений (11) с учетом (8) и граничных условий:

$$n(L/2) = n(E_F^{(v)}(-L/2) - e\phi_b), \quad p(-L/2) = p(E_F^{(v)}(-L/2)), \\ \varphi(-L/2) = 0, \quad \varphi(L/2) = \phi_b - U, \quad J_n(-L/2) = J_p(L/2) = 0.$$

Расчет статических вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик выполнен для кремниевого диода длиной $L = 10$ мкм с параметром профиля легирования $l = 200$ нм акцепторами (бором; $|ap\rangle$) и донорами (фосфором; $|dn\rangle$) при $N_a(-L/2) = N_d(L/2) = 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, $K_a = K_d = 0.7$, шириной δ -слоя $\Delta = 3l = 0.6$ мкм и концентрацией t -дефектов $N_t(0) = 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ в центре металлургического p - n -перехода с уровнями энергии $E_1^{(v)} = 210$ мэВ и $E_2^{(v)} = 780$ мэВ (рисунок 5).

Показано, что в p - t - n -диоде, содержащем δ -слой t -дефектов, при прямом смещении имеется участок стабилизации тока. При обратном электрическом смещении плотность тока в таком диоде много больше, чем в p - n -диоде без



1 — p - n -диод ($N_t(0) = 0$), 2 — p - t - n -диод ($N_t(0) = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)

Рисунок 5. – Зависимость стационарной плотности электрического тока $J = J_n(x) + J_p(x)$ электронов c -зоны $J_n(x)$ и дырок v -зоны $J_p(x)$ (а) и удельной емкости C_d/S (б) от напряжения U на p - t - n -диоде с площадью S плоского p - n -перехода при $T = 300 \text{ K}$

t -дефектов. При увеличении обратного смещения емкость p - t - n -диода, в отличие от p - n -диода, вначале увеличивается, а затем уменьшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Развита модель ионизационного равновесия в алмазе p -типа между водородоподобными акцепторами (атомами бора) и дырками v -зоны, которая учитывает уменьшение энергии термической ионизации бора при увеличении его концентрации, а также электростатические флуктуации, обусловленные кулоновским взаимодействием ближайших по расстоянию точечных зарядов (ионов примесей и дырок). Рост флуктуаций потенциальной энергии дырок из-за легирования алмаза бором увеличивает отношение коэффициента диффузии к дрейфовой подвижности как для дырок v -зоны, так и для прыгающих по атомам бора дырок. Для температуры, при которой зонная электропроводность дырок v -зоны на постоянном токе равна прыжковой электропроводности дырок по атомам бора, дана оценка дрейфовой прыжковой подвижности дырок [4, 8].

2. Предложен метод расчета сужения энергетической щели Хаббарда между A^0 - и A^+ -акцепторными зонами в дырочном полупроводнике (или D^0 - и D^- -донорными зонами в электронном полупроводнике), позволяющий определить переход полупроводника из изоляторного состояния в металлическое при увеличении уровня легирования. Показано, что сужение щели Хаббарда происходит вследствие формирования из возбужденных состояний электрически нейтральных трехзарядных A -акцепторов (или D -доноров) квазинепрерывной зоны разрешенных значений энергии для дырок (или электронов), которая сливается с потолком v -зоны для акцепторов (с дном c -зоны для доноров) [3, 9].

3. Установлено, что для точечных t -дефектов в трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$ в случае, когда энергетические ширины двух зон этих дефектов (т. е. разброс значений их уровней энергии) в запрещенной зоне полупроводника меньше тепловой энергии, можно аналитически выделить выражения для длины экранирования внешнего стационарного электрического поля и прыжковой длины диффузии электронов по дефектам [1, 2, 10, 11].

4. Построена модель кремниевого p - n -диода с однородно распределенными t -дефектами в трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$, в котором перенос зарядов осуществляется посредством прыжков одиночных электронов между t -дефектами. В рамках этой модели рассчитаны статические вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики диода. Показано, что при низких температурах такой диод имеет асимметричную зависимость стационарного прыжкового тока от полярности приложенного напряжения из-за энергетического барьера между p - и n -областями, сформированного t -дефектами и полностью ионизованными водородоподобными акцепторами и донорами [5, 6, 12, 13].

5. Построена модель симметричного кремниевого p - n -диода, содержащего в области плоского p - n -перехода δ -слой t -дефектов, для которого в рамках дрейфово-диффузионного приближения рассчитаны квазистатическая емкость и плотность электрического тока при прямом и обратном напряжениях смещения. Показано, что из-за различия темпов генерационно-рекомбинационных процессов для электронов и дырок в δ -слое при прямом электрическом смещении диода наблюдается участок стабилизации тока, а при обратном смещении — монотонное изменение емкости [7].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Модель p - n -диода с прыжковым переносом электронов между неподвижными точечными t -дефектами в трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$, которые равномерно распределены по кристаллической матрице кремниевого диода, может использоваться для разработки радиационно-стойких выпрямителей прыжкового тока при криогенных температурах;

2. Модель кремниевого диода, содержащего в области p - n -перехода δ -слой t -дефектов, может быть использована для расчета параметров стабилизаторов прямого тока на основе таких диодов;

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре физики полупроводников и нанoeлектроники БГУ, а также в процесс разработки радиационно-стойких биполярных транзисторов на ОАО «ИНТЕГРАЛ». Использование результатов планируется в ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», в ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси», в ОАО «Минский НИИ радиоматериалов».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**Статьи в научных журналах в соответствии с п. 18 Положения
о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий
в Республике Беларусь**

1. Поклонский, Н.А. Дрейф и диффузия электронов по двухуровневым (трехзарядным) точечным дефектам в кристаллических полупроводниках / Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, С.А. Вырко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 3. – С. 37–43.
2. Поклонский, Н.А. Стационарная прыжковая миграция биполяронов по «мягким» точечным дефектам в частично разупорядоченных полупроводниках / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, А.И. Ковалев // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2014. – № 3. – С. 91–96.
3. Квазиклассическая модель щели Хаббарда в слабо компенсированных полупроводниках / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, А.И. Ковалев, А.Г. Забродский // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 302–312.
4. Ionization equilibrium at the transition from valence-band to acceptor-band migration of holes in boron-doped diamond / N.A. Poklonski, S.A. Vyrko, O.N. Poklonskaya, A.I. Kovalev, A.G. Zabrodskii // J. Appl. Phys. – 2016. – Vol. 119, № 24. – P. 245701 (10 pp.).
5. Полупроводниковый диод с прыжковой миграцией электронов по точечным дефектам кристаллической матрицы / Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, С.А. Вырко, А.Т. Власов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 3. – С. 30–37.
6. Поклонский, Н.А. Низкочастотная электроемкость полупроводникового диода с прыжковой электропроводностью по трехзарядным дефектам / Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, С.А. Вырко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 4. – С. 52–59.
7. Расчет статических параметров кремниевого диода, содержащего в симметричном $p-n$ -переходе δ -слой точечных трехзарядных дефектов / Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, Н.И. Горбачук, С.В. Шпаковский // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 2. – С. 130–141.
8. Drift-diffusion model of hole migration in diamond crystals via states of valence and acceptor bands / N.A. Poklonski, S.A. Vyrko, A.I. Kovalev, A.N. Dzera-viaha // J. Phys. Commun. – 2018. – Vol. 2, № 1. – P. 015013 (14 pp.).
9. Поклонский, Н.А. Термическая энергия активации прыжковой ε_2 -электропроводности по атомам бора в слабо компенсированном кремнии / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, А.И. Ковалев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 406–414.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

10. Поклонский, Н.А. Биполярная прыжковая электропроводность по дефектам в самокомпенсированных полупроводниках / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, А.И. Ковалев // *Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. V Междунар. науч. конф.*, Минск, 10–11 окт. 2012 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2012. – С. 78–81.

11. Поклонский, Н.А. Распределение электростатического потенциала и зарядовых состояний неподвижных дефектов при прыжковой миграции электронов между ними в полупроводниковой пленке / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, А.И. Ковалев // *Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. трудов IX Междунар. конф.*, Санкт-Петербург, 7–10 июля 2014 г. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 93–94.

12. Интегральная электрическая емкость полупроводникового диода с трехзарядными радиационными точечными дефектами / Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, С.А. Вырко, А.Т. Власов // *Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2016): сб. докл. Междунар. науч. конф.*, Минск, 22–25 нояб. 2016 г.: в 3 т. / редкол.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск: Ковчег, 2016. – Т. 2. – С. 135–138.

13. Дифференциальная емкость полупроводникового диода с прыжковой проводимостью по радиационным дефектам / Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, С.А. Вырко, А.Т. Власов // *Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф.*, Минск, 12–13 окт. 2016 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2016. – С. 178–181.

Ковалев Александр Игоревич

ДРЕЙФ И ДИФФУЗИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ТРЕХЗАРЯДНЫМ ТОЧЕЧНЫМ ДЕФЕКТАМ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ И ДИОДАХ

Ключевые слова: двух- и трехзарядные атомы легирующих примесей, трехзарядные t -дефекты кристаллической структуры, прыжковая электропроводность, длина экранирования, длина прыжковой диффузии электронов, p - n -диод с t -дефектами, вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики.

Цель работы — аналитическое и численное исследование ионизационного равновесия, экранирования внешнего электрического поля, статической электрической проводимости и емкости полупроводниковых материалов и p - n -диодов в условиях зонной и прыжковой миграции электронов и дырок.

Методы исследования: статистическая физика точечных дефектов, электронов и дырок, аналитическое (в линейном приближении) и численное решение нелинейных дифференциальных уравнений методом конечных разностей.

Получены новые результаты: 1) Для легированных бором кристаллов алмаза p -типа в квазиклассическом приближении уточнена температура, при которой электропроводность дырок v -зоны равна прыжковой электропроводности дырок по акцепторам (атомам бора) в зарядовых состояниях (0) и (-1). 2) Рассчитана зависимость термической энергии активации прыжковой электропроводности по атомам бора в алмазе от их концентрации. 3) Проведен расчет концентрационного сужения энергетической щели между $D^-(A^+)$ - и $D^0(A^0)$ -зонами трехзарядных (-1, 0, +1) атомов примесей (D — доноры, A — акцепторы) в полупроводниках n - и p -типа на диэлектрической стороне фазового перехода изолятор–металл (перехода Мотта). 4) В дрейфово-диффузионном приближении получены аналитические выражения для длины экранирования внешнего стационарного электрического поля и длины диффузии электронов, прыгающих по t -дефектам в зарядовых состояниях (-1), (0) и (+1). 5) Построена модель p - n -диода с переносом электронов по t -дефектам, предсказывающая асимметрию величины стационарного прыжкового тока в зависимости от полярности приложенного напряжения. 6) Предложена модель кремниевого p - n -диода, содержащего в области плоского p - n -перехода δ -слой t -дефектов. Показано, что из-за различия темпов генерации и рекомбинации для электронов и дырок в δ -слое диод имеет участок стабилизации прямого тока.

Рекомендации по использованию и область применения. Модель p - n -диода с равномерно распределенными t -дефектами может использоваться для разработки радиационно-стойких выпрямителей прыжкового тока, а модель с δ -слоем t -дефектов в p - n -переходе — для создания стабилизаторов прямого тока.

ДРЭЙФ І ДЫФУЗИЯ ЭЛЕКТРОНАЎ ПА ТРОХЗАРАДАВЫМ КРОПКАВЫМ ДЭФЕКТАМ У ПАЎПРАВАДНІКОВЫХ КРЫШТАЛЯХ І ДЫЁДАХ

Ключавыя словы: двух- і трохзарадавыя атамы легіруючых дамешкаў, трохзарадавыя t -дэфекты крышталічнай структуры, скачковая электраправоднасць, даўжыня экранавання, даўжыня скачковай дыфузіі электронаў, p - n -дыёд з t -дэфектамі, вольт-амперная і вольт-фарадная характарыстыкі.

Мэта працы — аналітычнае і колькаснае даследванне іанізацыйнай раўнавагі, экранавання знешняга электрычнага поля, статычнай электраправоднасці і ёмістасці паўправадніковых матэрыялаў і p - n -дыёдаў ва ўмовах зоннай і скачковай міграцыі электронаў і дзірак.

Метады даследвання: статыстычная фізіка кропкавых дэфектаў, электронаў і дзірак, аналітычнае (у лінейным набліжэнні) і лікавае рашэнне нелінейных дыферэнцыяльных раўнанняў метадам канчатковых рознасцяў.

Атрыманыя новыя вынікі: 1) Для легіраваных бораў крышталяў алмаза p -тыпу ў квазікласічным набліжэнні ўдакладнена тэмпература, пры якой электраправоднасць дзірак v -зоны роўная скачковай электраправоднасці дзірак па вадародападобным акцэптарам (атамам бору) у зарадавых станах (0) і (-1). 2) Разлічана залежнасць тэрмічнай энергіі актывацыі скачковай электраправоднасці па атамах бору ў алмазе ад іх канцэнтрацыі. 3) Праведзены разлік канцэнтрацыйнага звужэння энергетычнай шчыліны паміж $D^-(A^+)$ - і $D^0(A^0)$ -зонамі трохзарадавых (-1, 0, +1) атамаў дамешкаў (D — донары, A — акцэптары) у паўправадніках n - і p -тыпу на дыэлектрычным баку фазавага пераходу ізалятар–метал (пераход Мотту). 4) У дрэйфава-дыфузійным набліжэнні атрыманы аналітычныя выразы для даўжыні экранавання знешняга стацыянарнага электрычнага поля і даўжыні дыфузіі электронаў, якія скачуць па t -дэфектах у зарадавых станах (-1), (0) і (+1). 5) Пабудавана мадэль p - n -дыёда з пераносам электронаў па t -дэфектам, якая прадказвае асіметрыю велічыні стацыянарнага скачковага току ў залежнасці ад палярнасці прыкладзенай напругі. 6) Прапанавана мадэль крэмнавага p - n -дыёда з δ -слоем t -дэфектаў у вобласці плоскага p - n -пераходу. Паказана, што з прычыны адрознення тэмпаў генерацыі і рэкамбінацыі для электронаў і дзірак у δ -слое дыёд мае ўчастак стабілізацыі прамога току.

Рэкамендацыі па выкарыстанню і вобласці прымянення. Мадэль p - n -дыёда з раўнамерна размеркаванымі t -дэфектамі можа выкарыстоўвацца для распрацоўкі радыяцыйна-ўстойлівых выпрамляльнікаў скачковага току, а мадэль з δ -слоем t -дэфектаў у p - n -пераходзе — для стварэння стабілізатараў прамога току.

SUMMARY

Kavaleu Aliaksandr Iharavich

ELECTRON DRIFT AND DIFFUSION VIA TRIPLE CHARGED POINT DEFECTS IN SEMICONDUCTOR CRYSTALS AND DIODES

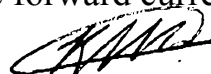
Keywords: double and triple charged doping impurity atoms, triple charged t -defects of crystalline structure, hopping electrical conductivity, screening length, hopping diffusion length for electrons, p - n -diode with t -defects, current-voltage and capacitance-voltage characteristics.

The goal of this work: analytical and numerical study of ionization equilibrium, screening of external electric field, dc electrical conductivity and capacitance of semiconductor materials and p - n -diodes under the conditions of band-like and hopping migration of electrons and holes.

Methods of the study: statistical physics of point defects, electrons and holes, analytical (in the linear approximation) and numerical solution of nonlinear differential equations by the finite difference method.

The new results were obtained: 1) In a quasi-classical approximation for boron doped p -type diamond crystals, the temperature was specified, for which the conductivity of the v -band holes is equal to the hopping conductivity of holes via the acceptors (boron atoms) in the charge states (0) and (-1). 2) Dependence of the thermal activation energy of hopping electrical conductivity via boron atoms in diamond with respect to their concentration was calculated. 3) Calculation of the concentration-induced narrowing of the energy gap between the $D^-(A^+)$ - and $D^0(A^0)$ -bands of triple charged (-1, 0, +1) impurity atoms (D is for donors, A is for acceptors) was performed for n - and p -type semiconductors on the insulator side of the insulator-metal phase transition (Mott transition). 4) In the drift-diffusion approximation, the analytical expressions were found for the screening length of the stationary electric field and for the diffusion length of electrons hopping via t -defects in the charge states (-1), (0) and (+1). 5) A model for p - n -diode with electron transfer via t -defects was built; the model predicts an asymmetry of stationary hopping current depending on the polarity of the applied voltage. 6) A model of silicon based p - n -diode containing δ -layer of t -defects in the region of plain p - n -junction was proposed. It was shown that due to the difference in the rate of generation and recombination for electrons and holes in δ -layer the diode has a region of forward current stabilization.

Recommendations for the use and application area. The model of p - n -diode with uniformly distributed t -defects can be used for the elaboration of radiation-hardened hopping current rectifiers and the model with δ -layer of t -defects in the p - n -junction can be used for producing stabilizers of the forward current.



Подписано в печать 16.11.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 85 экз. Заказ № 564.

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.