Министерство науки и высшего образования Российской Федерации НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ) Радиофизический факультет Кафедра полупроводниковой электроники

> ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК Руководитель ООП канд. физ.-мат. наук, доцент \_\_\_\_\_\_M М. Л. Громов «\_\_\_\_\_\_» июня 2023 г.

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

# РАСЧЁТ Р-І-Л-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АЛМАЗА

по основной образовательной программе подготовки бакалавров Направление подготовки 03.03.03. – Радиофизика Костарев Иван Александрович

Руководитель ВКР кандидат физ.-мат. наук, доцент Е.И.Липатов «<u>0</u> *9* » июня 2023 г.

Автор работы: студент группы № 793

Киту И. А. Костарев / «<u>09</u>» июня 2023 г.

Томск-2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ) Радиофизический факультет

### УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОПОП канд. физ.-мат. наук, доцент <u>мммм</u>М.Л. Громов 14 октября 2022 г.

## ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы обучающемуся Костареву Ивану Александровичу

по направлению подготовки 03.03.03 Радиофизика,

профиль «Радиофизика, электроника и информационные системы».

1 Тема выпускной квалификационной работы бакалавра:

«Расчет *p*-*i*-*n*-структур на основе алмаза».

2 Срок сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы:

а) на кафедру –	06.06.2023	
б) в ГЭК –	12.06.2023	

#### 3 Исходные данные к работе:

<u>Объект исследования</u> – многослойные структуры на основе синтетического алмаза, содержащие замещающий бор, NV-центры и замещающий фосфор.

<u>Предмет исследования</u> – расчёт вольт-амперных характеристик, сравнение с экспериментальными данными из литературы.

<u>Цель исследования</u> – моделирование инжекции носителей в высокоомную *i*-область *p*-*i*-*n*диода.

## Задачи:

- 1. Произвести расчёт вольт-амперных характеристик для различных концентраций примесей в слоях *p*-*i*-*n*-диода.
- 2. Верификация модели экспериментальными данными из литературных источников.
- 3. Доработка модели.
- 4. Выявление ограничений модели.

Метод исследования: численное моделирование.

## Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа:

1) Институт сильноточной электроники СО РАН, 2) Томский государственный университет. Работы ведутся в интересах внедрения фотонных технологий на основе алмаза.

## 4. Краткое содержание работы:

Изучить имеющуюся литературу по направлению: «*P*-*i*-*n*-диоды на основе синтетического алмаза, в том числе светоизлучающие структуры». Произвести моделирование вольт-амперной характеристики *p*-*i*-*n*-структуры в зависимости от концентраций замещающего бора, NV-центров и замещающего фосфора. Оценить концентрации инжектируемых носителей в *i*-области *p*-*i*-*n*-диода при различных величинах варьируемых параметров.

Руководитель выпускной квалификационной работы -

зав. лабораторией квантовых информационных технологий РФФ, кандидат физ.-мат. наук

Е. И. Липатов

Китр / И.А.Костарев

Задание принял к исполнению

студент

## АННОТАЦИЯ

Отчёт по ВКР содержит: 29 страниц, 3 главы, 18 рисунков, 3 формулы и 36 источников. АЛМАЗ, NV-ЦЕНТР, *P-I-N* – ДИОД, ПРИМЕСЬ, ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА.

Целью данной работы является моделирование инжекции носителей в высокоомную *i*-область *p*-*i*-*n* – диода.

Объектом исследования являются многослойные структуры на основе синтетического алмаза, содержащие легирующую примесь бор, NV-центры и легирующую примесь фосфор.

Для достижения данной цели были изучены литературные данные о способах синтеза алмаза, о влиянии примесей - бор, фосфор и азот на физические свойства алмаза. Также изучены физические процессы в *p-i-n* – структуре, рассмотрено аналитическое выражение вольт-амперной характеристики *p-i-n* – диода.

Для моделирования изучены инструменты SDE и SDEVICE системы автоматизированного проектирования (САПР) Sentaurus Technology Computer Aided Design (TCAD).

Получены результаты моделирования вольт-амперных характеристик структуры в САПР *TCAD*, которые показывают влияние различных параметров областей на значения напряжений и прямых токов.

# оглавление

Bl	ВЕДЕНИЕ	6
1 Физи	ко-химические свойства <i>p–i–n-</i> структур на основе алмаза	7
1.1	Синтез алмаза методом температурного градиента в условиях НРНТ	7
1.2	Газохимическое осаждение алмаза (ГХО)	8
1.3	Замещающий бор в алмазе	9
1.4	Замещающий азот в алмазе	9
1.5	Замещающий фосфор в алмазе	10
1.6	Вольт-амперная характеристика <i>p–i–n-</i> диода	10
1.7	Выводы по главе 1. Постановка задачи	12
2. M	етодика моделирования	14
2.1. 0	Основы работы в TCAD Sentaurus (Technology Computer Aided Design)	14
3. Pe	зультаты моделирования	17
<b>3</b> A	АКЛЮЧЕНИЕ	25
Cl	ПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	
Π	РИЛОЖЕНИЕ 1	29

### **ВВЕДЕНИЕ**

Хорошо известно, что синтетический алмаз является наиболее перспективным материалом среди других широкозонных полупроводников для мощных и высокотемпературных приборов благодаря превосходным свойствам материала [1-4].

Разработка алмазных диодов, работающих при больших напряжениях, и диодов с высокой плотностью прямого тока длилась много лет, но в настоящее время созданы либо диоды, работающие при больших напряжениях [5–7], либо диоды с высокой плотностью прямого тока [8–11] и лишь очень малая часть диодов демонстрирует как высокое напряжение, так и высокий прямой ток [12,13]. Совокупность этих функциональных характеристик является наиболее важной для широкого практического применения в высокочастотной и импульсной высоковольтной силовой выпрямительной электронике [3,6].

Невзирая на то, что в алмазной электронике наблюдается значительный прогресс, полупроводниковые устройства на основе алмаза всё ещё не используются в силовой электронике ввиду относительно низких значений прямого тока.

По этой причине актуальной задачей является экспериментальное и теоретическое изучение влияния областей диодной структуры на основе алмаза на её электрические и оптические характеристики.

Целью выпускной квалификационной работы является моделирование вольт-амперных характеристик *p—i—n*-диода на основе алмаза, в частности – изучение влияния легирования на процесс инжекции носителей в высокоомную *i*-область диода.

В настоящем отчёте проводится анализ литературных данных об электрических и оптических характеристиках структур на основе алмаза и влияния на них легирования. Описана методика проведения расчётов в системе автоматизированного проектирования *TCAD Synopsys*. Представлены результаты расчётов и их анализ.

6

## 1 Физико-химические свойства *p-i-n*-структур на основе алмаза

# 1.1 Синтез алмаза методом температурного градиента в условиях НРНТ

Метод температурного градиента в *HPHT* условиях (*High Pressure, High Temperature* – в переводе с английского - «высокое давление, высокая температура»). В гидравлическом прессе создаются условия подобные природной среде, в них углерод-графит превращается в алмаз. При синтезе алмаза по этой технологии применяется пресс с давлением порядка 50-70 тысяч атмосфер, необходимы электрический ток и нагревание до 1500<sup>0</sup>C (рис. 1). Выращивание кристаллов алмаза в зависимости от размеров длится от 40 минут до десятков суток. Для увеличения темпа роста кристалла и снижения давления применяют металлические сплавы катализаторы-растворители – железо-никель или железо-кобальт – которые растворяют графит, представляющий источник углерода для осаждения на затравку в виде алмазной фазы [14]. Это, в термодинамическом смысле, равновесный метод синтеза.



Рисунок 1.1 – Схема НРНТ установки [14]

# 1.2 Газохимическое осаждение алмаза (ГХО)

Химическое осаждение из газовой фазы, или CVD (Chemical Vapor Deposition), является процессом газохимического осаждения, который осуществляется в газовой фазе и приводит к осаждению конечного продукта реакции на поверхность подложки. Важным аспектом этого процесса является химическая реакция, которая происходит над поверхностью подложки, что позволяет получить различные материалы с заданными свойствами. Для создания алмазных пленок применяются различные методы активации углеродсодержащих молекул, такие как термический метод с горячей проволокой или плазменный метод с использованием плазмы тлеющего разряда, высокочастотной плазмы сверхвысокочастотной плазмы [15]. Однако получаемые или при ЭТОМ поликристаллические пленки имеют чувствительную к точным условиям роста морфологию. Скорости роста пленок в процессе CVD могут сильно изменяться в зависимости от используемых методов. Быстрый рост наблюдается при использовании метода осаждения алмаза с помощью сжигания молекул углеводорода, но у такого метода есть недостатки – рост плёнок протекает лишь в небольших локальных областях и слабо контролируется. Из вышеуказанного можно сделать вывод: плёнки, полученные при использовании данного метода, имеют низкое качество.



Рисунок 1.2 – Синтез алмаза в ГХО-установке ИСЭ РАН

# 1.3 Замещающий бор в алмазе

В природе алмазы с акцепторной проводимостью р-типа встречаются очень редко. Энергия ионизации примеси для этих кристаллов равняется 368 ± 1.5 мэВ [16-18]. Изначально основной акцепторной примесью в алмазе считался алюминий [19], однако позже было обнаружено, что данное свойство характерно для кристаллов голубой окраски, в которых основной примесью с концентрацией, как правило, менее 1 *ppm* является бор [17]. Большие концентрации легирующей примеси могут быть получены в процессе синтеза алмазов различными методами, о которых было сказано выше. В настоящее время бор – единственная легирующая примесь для монокристаллов алмаза с возможностью контролируемого и воспроизводимого введения в материал в широком диапазоне концентраций (возможно по причине своего малого атомного радиуса) [22,23].

Простая оценка энергии связи для акцепторов в приближении эффективной массы может быть дана с помощью следующего уравнения:

$$E_A = \binom{m_h^*}{m_0} * \frac{1}{s^2} * R_y \tag{1.1}$$

где  $R_y = 13,6$  эВ – постоянная Ридберга,  $m_h^*$  - эффективная масса дырки,  $\varepsilon = 5,7$  – относительная диэлектрическая проницаемость алмаза. Данный расчет показывает, что энергия  $E_A = 0,41$  эВ, что, в свою очередь, достаточно близко к значению 0,37 эВ, определенному экспериментально.

Алмазы, легированные бором, исследуются уже в течение 40 лет [20,21], однако детальная структура и ее влияние на фундаментальные физические свойства не до конца исследованы. Отдельной областью интересов является проявление В алмазе сверхпроводимости высоких концентрациях легирующей примеси бора при (более 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>) [22,23].

### 1.4 Замещающий азот в алмазе

Известно, что азот в виде атомов замещения в алмазе, является легирующей примесью n-типа [24]. Согласно расчётам он должен образовывать глубокий уровень и иметь отрицательную энергию образования как нейтральная примесь [25]. Это объясняет, почему азот является преобладающей примесью, присутствующей в большинстве природных алмазов. Его можно найти в концентрациях до 0,3% в различных формах, таких как замещающие атомы или в различных агрегатах и примесно-дефектных комплексах. Замещающие атомы азота и  $N_2$ -агрегаты действуют, как и ожидалось, как глубокие доноры

с энергиями ионизации 1,7 и 4 эВ соответственно и, следовательно, не оказывают существенного влияния на электропроводность алмаза при комнатной температуре [24].

## 1.5 Замещающий фосфор в алмазе

Рост тонких алмазных пленок с проводимостью n-типа является одной из самых сложных тем в области алмазов. Ожидается, что по аналогии с донорами в кремнии элементы группы V(N, P) будут создавать неглубокие донорные уровни в алмазе. Поскольку азот приводит к глубокому уровню 1,7 эВ [26], усилия были сосредоточены на легировании фосфором при газохимическом осаждении поликристаллических [27-29] и гомоэпитаксиальных алмазных пленок [30-31].

Одна из сложностей заключается в том, что включение фосфора осуществляется только на поверхности кристаллов алмаза с ориентацией (111), а гомоэпитаксия на таких подложках требует необычных условий роста (низкая концентрация метана, около 0,1%, и высокая температура, обычно 900С). Кроме того, ввиду высокой энергии ионизации фосфора концентрация носителей в зоне проводимости очень мала, а удельное сопротивление очень велико. Единственные воспроизводимые результаты получены в исследовании доктора Коидзуми, Сато и Камо в *NIRIM* (Цукуба, теперь *NIMS*) [32] при участии профессора Инузука и доктора Окано из Университета Аояма Гакуин (Токио). Группе учёных удалось легировать алмаз n-типа при необычных условиях роста для повышения качества роста и включения фосфора. Термическая активация фосфора достаточно высока, 600 мэВ, а подвижность невелика (до 250  $\frac{m^2}{B*c}$  для образца, легированного примерно с концентрацией 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>) [33].

## 1.6 Вольт-амперная характеристика *p–i–n-*диода

Диод, база которого представляет собой собственный или близкий к собственному полупроводник и заключена между сильнолегированными областями *p*- и *n*-типов, называется *p*-*i*-*n*-диодом (рис. 3).



Рисунок 1.3 – Одномерная модель *р*–*i*–*n*-диода [34]

При подаче на p-i-n-диод напряжения в пропускном направлении потенциальные барьеры p-i-i и n-i-переходов уменьшаются, вследствие этого из p-области в i-базу инжектируются дырки, а из n-области - электроны. Инжекция электронов и дырок приводит к уменьшению изначально высокого сопротивления i-области, и падение напряжения на ней становится малым по сравнению с падением напряжения на p-i и n-i - переходах. Следовательно, величина силы тока, протекающего через p-i-n-диод, должна определяться, в основном, суммой падений напряжения на p-i и n-i - переходах.

Получено выражение для прямой ветви вольт-амперной характеристики *p*-*i*-*n*-диода, исходя из следующих допущений:

Вследствие высокого уровня легирования *p*- и *n*-областей по сравнению с *i*-базой через *p*-*i*-переход течет чисто дырочный ток, а через *n*-*i*-переход — электронный. Это допущение может быть сформулировано и по-другому. Так как избыточные неосновные носители заряда практически не проникают в *p*- и *n*-области, то рекомбинацией электроннодырочных пар в этих областях можно пренебречь [34].

В *i*-области реализуется высокий уровень носителей заряда, т.е. *p*,*n*>>*ni*.

Падение напряжения на сопротивлениях *p*-и *n*-областей из-за сильного легирования пренебрежимо мало.

При высоком уровне инжекции время жизни носителей заряда в *i*-области не зависит от концентрации носителей заряда. Это допущение справедливо при рекомбинации носителей через рекомбинационные центры.

Таким образом, падение напряжения на *i*- области зависит лишь от параметров материала и от геометрических размеров этой области. С учётом этого обстоятельства плотность тока, протекающего через *p-i-n* – диод, можно представить в следующем виде:

11

$$J = J_0 \exp(\frac{eU}{2kT}), \tag{1.2}$$

где

$$J_{0} = \frac{2en_{i}sh(\frac{W}{L_{a}})exp(-(\frac{eU_{i}}{2kT}))}{L_{a}\sqrt{(D_{n}^{-2}+D_{p}^{-2})ch(\frac{W}{L_{a}})+D_{n}^{-1}D_{p}^{-1}(1+ch^{2}(\frac{W}{L_{a}}))}}$$
(1.3)

Если на p-i-n-диод подать напряжение противоположной полярности (на p-область отрицательный потенциал), то p-i и n-i переходы окажутся смещенными в запорном направлении. Поскольку концентрация примесей в i-области мала, то даже при сравнительно низких обратных напряжениях суммарная ширина ОПЗ p-i и n-i переходов станет равной W. Наоборот, в p- и n-областях ширина ОПЗ переходов будет мала даже при больших напряжениях из-за высокой концентрации примесей. Отсюда следует, что ёмкость p-i-n-диода при наличии обратного смещения определяется шириной i-области и практически не зависит от напряжения.

Обратный ток *p*-*i*-*n*-диода обусловлен экстракцией неосновных носителей заряда из *p*- и *n*-областей и тепловой генерацией электронно-дырочных пар в *i*-области [34].

## 1.7 Выводы по главе 1. Постановка задачи

Синтетический алмаз является наиболее перспективным материалом среди других широкозонных полупроводников для мощных и высокотемпературных приборов благодаря превосходным свойствам материала. Обзор литературы о физических свойствах алмаза, легированного примесями *p*- и *n*-типа позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработка высоковольтных алмазных диодов и диодов с высокой плотностью тока является наиболее важным для широкого практического применения в высокочастотной и импульсной высоковольтной силовой выпрямительной электронике;

2. Метод ГХО алмаза позволяет получать кристаллы лучшего качества;

3. В зависимости от условий синтеза алмаза получают различные глубины залегания и энергии ионизации;

4. *Р*-*i*-*n*-диод является структурой, способной к оптическому излучению.

В связи с вышесказанным, целью данной работы является моделирование инжекции носителей в высокоомную *i*-область *p*–*i*–*n*-диода.

Для достижения цели решались следующие задачи:

12

1. Произвести расчёт вольт-амперных характеристик для различных концентраций примесей в слоях *p*–*i*–*n*-диода.

2. Верификация модели экспериментальными данными из литературных источников.

- 3. Доработка модели.
- 4. Выявление ограничений модели.

## 2. Методика моделирования

## 2.1. Основы работы в TCAD Sentaurus (Technology Computer Aided Design)

Согласно общепринятому определению, предложенному разработчиками системы автоматизированного проектирования (САПР) компании Synopsys, термин «Технологии автоматизированного проектирования» использование означает компьютерного моделирования лля разработки оптимизации обработки И полупроводниковых технологий и устройств. Sentaurus TCAD предлагает полный комплекс продуктов, в котором учтены все современные процессы электроники, и применяются новейшие инструменты моделирования. Вдобавок пользователю предоставляется развитый графический интерфейс, что позволяет провести симуляции, управление задачами моделирования и анализ результатов [35].

Программный пакет *TCAD* имеет встроенную систему помощи, включающую в себя руководства по использованию каждого программного компонента, обучающие материалы (*training*) и примеры проектов моделирования. Согласно релизу 2014 г. [35] пакет программ *Sentaurus TCAD* условно разделен на четыре основных подсистемы (см. рисунок 2.1): 1) симуляция технологических процессов; 2) задание конструкции приборов; 3) моделирование работы устройств и паразитных процессов межсоединений; 4) программы для управления проектами, задания условий и параметров моделирования, сохранения и анализа результатов.



Sentaurus TCAD Suite

Рисунок 2.1 – Состав пакета программ Sentaurus TCAD [35]

Для синтеза конструкций приборов служит Sentaurus Structure Editor (SSE) - программа задания двух- и трехмерных приборных структур и имитации выполнения трехмерных технологических процессов. Эти режимы могут работать одновременно, что позволяет сделать более гибким процесс создания трехмерных конструкций приборов. Редактирование структур включает генерацию геометрической модели, задание профилей легирования и выделение областей, определение сеток и подсеток. Численные расчеты характеристик моделируемых приборов осуществляется тремя модулями: Sentaurus Device, Raphael и Sentaurus Interconnect. Sentaurus Device – основная программа двух- и трехмерных расчетов широкого ряда полупроводниковых приборов от глубоко субмикронного МДП транзистора до больших и мощных биполярных структур. Этот ряд включает также структуры на карбиде кремния, гомо- и гетероструктуры на соединениях материалов III – V группы [35].

Программа *Sentaurus Device* позволяет проводить многомерное моделирование изолированных полупроводниковых приборов, а также приборов, соединенных в общую схему.

Все модули Sentaurus TCAD могут работать автономно как отдельные программы под управлением Unix-подобной операционной системы. Для удобства пользователей и в зависимости от решаемых задач управление работой любого из нескольких десятков инструментов Sentaurus TCAD может также осуществляться в едином связанном потоке моделирования с помощью интегрированных вычислительных сред (Framework) Sentaurus Workbench, Sentaurus Visual и Sentaurus PCM Studio.

Sentaurus Workbench (SWB) – представляет собой пакет программ, который обеспечивает удобную интегрированную среду для разработки, организации и автоматического выполнения полного сценария *TCAD* моделирования. Он имеет графический пользовательский интерфейс для запуска различных инструментов моделирования и визуализации *Synopsys*, а также других сторонних утилит. Пример интерфейса *SWB* с открытым окном выбора инструментов для моделирования приведен на рисунке 2.2 [35].

15



Рисунок 2.2 – Интерфейс управляющей программы Sentaurus Work Bench [35]

*SWB* позволяет полностью автоматизировать выполнение параметрического анализа, поддерживает также дизайн-эксперименты, извлечения и анализа результатов, оптимизации и анализа неопределенности. Он имеет встроенный планировщик заданий, чтобы ускорить моделирование и использует все преимущества распределенных, гетерогенных, так и корпоративных вычислительных ресурсов. Одним из основных преимуществ *SWB* является возможность параметризации входных файлов для запуска моделирования групп автоматически [35].

Sentaurus Visual – служит для визуализации результатов сложных симуляций, полученных с помощью инструментов моделирования физических в одном, двух и трех измерениях. Удобный графический интерфейс пользователя содержит инструменты для масштабирования, панорамирования и поворота изображений и предоставляет возможности просматривать профили легирования и концентрации носителей в *p*–*n*- переходах, анализировать истощение слоев, вольт-амперные характеристики. Имеется возможность извлекать и сохранять данные с помощью измерительных зондов [35].

## 3. Результаты моделирования

На рисунках 3.1, 3.2, 3.3, 3.5, 3.6, 3.8, 3.10 представлены вольт-амперные характеристики *p-i*-структуры с барьером Шоттки в полулогарифмических координатах. Структура смоделирована при следующих параметрах: размеры *p*-области 3000х300 мкм, концентрация примеси в *p*-области 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>, энергия ионизации примеси в *p*-области 0,36 эВ, размеры *i*-области 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>, энергия ионизации примеси в *i*-области 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>, энергия ионизации примеси в *i*-области 3000х10 мкм, концентрация примеси в *i*-области 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>, энергия ионизации примеси в *i*-области 3000х10 мкм, концентрация примеси в *i*-области 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>, энергия ионизации примеси в *i*-области 3000х10 мкм, концентрация примеси в *i*-области 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>, энергия ионизации примеси в *i*-области 0,36 эВ, высота барьера Шоттки 0,1 эВ, температура 300К.

На рисунке 3.1 представлены вольт-амперные характеристики при различных значениях толщины *i*-области. Толщина варьировалась от 10 мкм до 80 мкм. Полученные зависимости позволяют сделать вывод: увеличение толщины *i*-области приводит к уменьшению значений прямого тока.



Рисунок 3.1 – Влияние толщины *i*-области на вольт-амперные характеристики

На рисунке 3.2 представлены зависимости тока при максимальном напряжении 10 В от толщины *i*-области. Данная зависимость имеет сигмоидальный вид. Чем больше толщина *i*-области, тем большая доля напряжения падает на ней и меньшая доля напряжения управляет инжекцией носителей заряда.



Рисунок 3.2 – Зависимости тока при максимальном напряжении от толщины *i*-области

На рисунке 3.3 представлены вольт-амперные характеристики при различных значениях энергий ионизации примесей в обеих областях. Варьировались энергии ионизации примесей от 0,1 эВ, до 0,36 эВ. Полученные зависимости позволяют сделать вывод: уменьшение энергий ионизации примесей в обеих областях приводит к увеличению значений прямого тока.



Рисунок – 3.3 Влияние энергий ионизации примесей на вольт-амперные характеристики

На рисунке 3.4 представлена зависимость тока при максимальном напряжении от энергий ионизации примесей в обеих областях. Данная зависимость имеет экспоненциальный вид. Уменьшение энергии ионизации приводит к увеличению

концентрации дырок в *i*-области примерно на 2 порядка при неизменной концентрации примеси.



Рисунок 3.4 – Зависимость тока при максимальном напряжении от энергий ионизации примесей

На рисунке 3.5 представлены вольт-амперные характеристики при различных значениях концентрации примеси в *i*-области. Варьировалась концентрация примеси в *i*-области от  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> до  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Полученные зависимости позволяют сделать вывод: изменение концентрации легирующей примеси в *i*-области не приводит к изменению максимальных значений прямого тока. По-видимому, в данном случае основная доля напряжения падает на р-области из-за её большей толщины, а неравновесная концентрация дырок в *i*-области при прямом смещении задаётся не концентрацией примеси, а инжекцией их из *p*-области.



Рисунок 3.5 – Влияние концентрации легирующей примеси в *i*-области на вольт-амперные характеристики

На рисунке 3.6 представлены вольт-амперные характеристики при различных значениях концентрации примеси в *p*-области. Варьировалась концентрация примеси в *p*-области от  $10^{20}$  см<sup>-3</sup> до  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Полученные зависимости позволяют сделать вывод: уменьшение концентрации примеси в *p*-области приводит к уменьшению значений прямого тока, поскольку основной вклад в сопротивление даёт *p*-область.



Рисунок 3.6 – Влияние концентрации легирующей примеси в *p*-области на вольт-амперные характеристики

На рисунке 3.7 представлена зависимость тока при максимальном напряжении от концентрации примеси в *p*-области. Данная зависимость имеет степенной вид.



Рисунок 3.7 - Зависимость тока при максимальном напряжении от концентрации легирующей примеси в *p*-области

На рисунке 3.8 представлены вольт-амперные характеристики в зависимости от различной высоты барьера Шоттки. Варьировалась высота барьера Шоттки от 0,1 эВ до 0,7 эВ. Полученные зависимости позволяют сделать вывод: увеличение высоты барьера Шоттки приводит к уменьшению значений прямого тока. В настоящее время нет полной ясности в структуре контакта металл-алмаз и его энергетической диаграмме. Поэтому в

расчётах предположено, что контакт образует барьер Шоттки с высотой в интервале от 0,1 эВ до 0,7 эВ.





На рисунке 3.9 представлена зависимость тока при максимальном напряжении от высоты барьера Шоттки.





На рисунке 3.10 представлены вольт-амперные характеристики в зависимости от различных значений температуры. Варьировалась температура от 300 до 450К.

Полученные зависимости позволяют сделать вывод: повышение температуры приводит к увеличению значений прямого тока. Повышение температуры приводит к увеличению концентрации дырок и эмиссии электронов из металла в алмаз.



Рисунок 3.10 – Влияние температуры на вольт-амперные характеристики

На рисунке 3.11 представлена зависимость тока при максимальном напряжении от температуры. Данная зависимость имеет экспоненциальный вид.



Рисунок 3.11 – Зависимость тока при максимальном напряжении от температуры

На рисунке 3.12 представлена экспериментальная вольт-амперная характеристика (плотность тока от напряжения) из литературного источника. [36]



Рисунок 3.12 – Экспериментальная вольт-амперная характеристика из литературного источника

На рисунке 3.13 представлена смоделированная вольт-амперная характеристика (плотность тока от напряжения) при 450К.



Рисунок 3.13 – Вольт-амперная характеристика (плотность тока от напряжения) при 450К

Таким образом, вид смоделированных вольт-амперных характеристик подтверждается данными из литературного источника. Расхождения в значениях прямого тока возможны ввиду отличия площадей структур и различных примесей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения ВКР были изучены литературные данные по свойствам синтетических алмазов и способах их получения. Освоена методика моделирования полупроводниковых приборов и их характеристик в САПР *TCAD Synopsys*. Проведено моделирование вольт-амперных характеристик *p-i*-структуры с барьером Шоттки на основе алмаза и исследование влияния различных параметров областей на характеристики структуры. Приведено сравнение с вольт-амперной характеристикой *p-i-n-*диода Результаты расчётов позволяют сделать следующие выводы:

- Наибольшее влияние на вид вольт-амперной характеристики и величину прямого тока оказывают высота барьера на контакте к *i*-области, энергии ионизации примесей и уровень легирования *p*-области.
- Изменение высоты барьера по-разному влияет на величину прямого тока при больших и малых значениях напряжения, что позволяет предположить о разных механизмах протекания тока через барьерный контакт.
- 3. Увеличение толщины *i*-области увеличивает падение напряжения на ней и уменьшает прямой ток.
- 4. Увеличение уровня легирования *p*-области увеличивает проводимость структуры и величину прямого тока.
- 5. Повышение температуры приводит к увеличению концентрации дырок и эмиссии электронов из металла в алмаз.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Field J.E., The Properties of Diamond, Academic Press, New York, 1979.

2. Chow T.P., Tyagi R., Wide bandgap compound semiconductors for superior highvoltage unipolar power devices, IEEE Trans. Electron Devices 41 (1994) 1481–1483. - http://dx.doi.org/10.1109/16.297751.

3. Isberg J., Hammersfeld J., Johansson E., et al., High carrier mobility in singlecrystal plasma-deposited diamond, Science 297 (2002) 1670–1672. http://dx.doi.org/ 10.1126/science.1074374.

4. Kalishr ., Diamond as a unique high-tech electronic material: difficulties and prospects, J. Phys. D. Appl. Phys. 40 (2007) 6467–6478. http://dx.doi.org/10.1088/ 0022-3727/40/20/S22.

5. Butler J.E., Geis M.W., Krohn K.E., et al., Exceptionally high voltage Schottky diamond diodes and low boron doping, Semicond. Sci. Technol. 18 (2003) S67–S71. http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/18/3/309.

6. Tatsumi N., Ikeda K., Umezawa H., Shikata S., Development of diamond Schottky barrier diode, SEI Technol. Rev. 68 (2009) 54–61.

7. Muret P., Volpe P.-N., Tran-Thi T.-N., et al., Schottky diode architectures on ptype diamond for fast switching, high forward current density and high breakdown field rectifiers, Diam. Relat. Mater. 20 (2011) 285–289. http://dx.doi.org/10.1016/ j.diamond.2011.01.008.

8. Vescan A., Daumiller I., Gluche P., Ebert W., Kohn E., High temperature, high voltage operation of diamond Schottky diode, Diam. Relat. Mater. 7 (1998) 581–584. http://dx.doi.org/10.1016/S0925-9635(97)00200-8.

9. Rashid S.J., Tajani A., Coulbeck L., et al., Modelling of single-crystal diamond Schottky diodes for high-voltage applications, Diam. Relat. Mater. 15 (2006) 317–323. http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2005.06.019.

10. Umezawa H., Tokuda N., Ogura M., Ri S.-G., Shikata S., Characterization of leakage current on diamond Schottky barrier diodes using thermionic-field emission modeling, Diam. Relat. Mater. 15 (2006) 1949–1953. http://dx.doi.org/10.1016/ j.diamond.2006.08.030.

 Umezawa H., Mokuno Y., Yamada H., Chayahara A., Shikata S., Characterization of Schottky barrier diodes on a 0.5-inch single-crystalline CVD diamond wafer, Diam. Relat. Mater. 19 (2010) 208–212. http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2009.11.001.

26

12. Umezawa H., Kato Y., Shikata S., 1  $\Omega$  on-resistance diamond vertical-Schottky barrier diode operated at 250 °C, Appl. Phys. Express 6 (2013) 011302. http://dx.doi.org/ 10.7567/APEX.6.011302.

13. Umezawa H., Shikata S., Leakage current analysis of diamond Schottky barrier diodes operated at high temperature, Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014). http://dx.doi.org/ 10.7567/JJAP.53.04EP04 (04EP04-1-4).

14. https://www.techinsider.ru/technologies/237923-kak-vyrashchivayut-krupneyshiev-mire-almazy-sdelano-v-rossii/

15. Шелованова, Г. Н. Современные проблемы микро- и наноэлектроники: учебное пособие / Г. Н. Шелованова; Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники

16. Collins A.T., Williams A.W.S. The nature of the acceptor centre in semiconducting diamond // Journal of Physics C: Solid State Physics. 1971. Vol. 4, № 13. P. 1789–1800.

17. Chrenko R. Boron, the Dominant Acceptor in Semiconducting Diamond // Physical Review B. 1973. Vol. 7, № 10. P. 4560–4567.

Wentorf R.H., Bovenkerk H.P. Preparation of Semiconducting Diamonds // J.
 Chem. Phys. 1962. Vol. 36, № 8. P. 1987.

19. Crowther P.A., Dean P.J., Sherman W.F. Excitation Spectrum of Aluminum Acceptors in Diamond under Uniaxial Stress // Physical Review. 1967. Vol. 154, № 3. P. 772–785.

20. Thonke K. The boron acceptor in diamond // Semiconductor Science and Technology. 2003. Vol. 18, № 3. P. S20–S26.

21. Prawer S., Nemanich R.J. Raman spectroscopy of diamond and doped diamond // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2004. Vol. 362, № 1824. P. 2537–2565.

22. Bustarret E., Kačmarčik J., Marcenat C., et al. Dependence of the Superconducting Transition Temperature on the Doping Level in Single-Crystalline Diamond Films // Phys. Rev.
B. 2004. Vol. 93, № 23.

23. Ekimov E.A., Sidorov V.A., Bauer E.D., et al. Superconductivity in diamond // Nature. 2004. Vol. 428, № 6982. P. 542–545.

24. Collins A.T., in Davies G. (ed.), *Properties aitd Grote th* o/ *Dia- mond*, INSPEC, 1994, p. 284.

25. Kajihara S.A., Antonelli A., Bernholc J. and Car R., Nitrogen doping of diamond by ion implantation // *Phys. Rev. Lett.*, 66 1991) 2010.

26. Farrer R.G., Solid State Commun. 7 (1969) 685.

27. Alexenko E., Spitsyn B.V., Diamond Relat. Mater. 1 (1992) 705.

28. Okano K., Kiyota H., Iwasaki T., et al., Appl. Phys. A 51 (1990) 344.

29. Flemish J.M., Schauer S.N., Wittstruck R., Landstrass M.I., Plano M.A., Diamond Relat. Mater. 3 (1994) 672.

Nishimori T., Nakano K., Sakamoto H., Takakuwa Y., Kono S., Appl. Phys. Lett.
 71 (1997) 945.

31. Saito T., Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998) L543.

32. Koizumi S., Kamo M., Sato Y., Ozaki H., Inuzuka T., Appl. Phys. Lett. 71 (1997) 1065.

33. Koizumi S., Teraji T., Kanda H., Diamond Relat. Mater. 9 (2000) 935.

34. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.: ил. – 1000 экз.

35. Индришенок В. И. Основы приборно-технологического моделирования в Sentaurus TCAD: Учебное пособие Индришенок В. И., Певцов Е. Ф. – М.: Московский технологический университет (МИРЭА), 2018.

36. Maitreya Dutta, Franz A. M. Koeck, Wenwen Li, Robert J. Nemanich, and Srabanti Chowdhury High Voltage Diodes in Diamond Using (100)- and (111)- Substrates

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1



Рисунок 1.2.2 – ГХО-установка ИСЭ СО РАН



# СПРАВКА

Томский Государственный Университет

о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

### ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Самоцитирование рассчитано для: Тип работы: Подразделение:

Костарев Иван Александрович

Костарев Иван Александрович Название работы: Отчёт ВКР Костарев ИА 4-й курс (5) Выпускная квалификационная работа



Структура документа: Модули поиска: Проверенные разделы: основная часть с.3-4, 6-16, 18-24, 28, приложение с.28

ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс\*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley ; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Лапутенко Андрей Владимирович

ФИО проверяющего

Дата подписи:

14-06-2023

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.