

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

УДК 658.5.012.1

Поляков  
Иван Сергеевич

Моделирование трёх- и четырёхбарьерных резонансно-туннельных структур  
на основе графена

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-41 80 01 «Микро- и наноэлектроника»

---

Научный руководитель  
Абрамов Игорь Иванович  
д-р физ-матем. наук, профессор

---

Минск 2022

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Абрамов Игорь Иванович,**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Прищеп Сергей Леонидович,**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный экономический университет»

Защита диссертации состоится «27» января 2022 г. года в 9<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 114, тел.: 293-89-26, e-mail: [kafme@bsuir.by](mailto:kafme@bsuir.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## ВВЕДЕНИЕ

Электронная промышленность за последние несколько десятков лет стала самой наукоёмкой и стремительно развивающейся промышленной отраслью в мире. С каждым годом электронные компоненты и интегральные схемы становятся всё меньше, энергопотребление уменьшается, частота работы устройств растёт. Также растёт и потребность промышленности к данным устройствам. Повсеместная автоматизация и компьютеризация производств привела к огромному спросу на продукцию электронной промышленности.

Однако в последние годы можно наблюдать определенный застой – характеристики электронных компонентов стали расти гораздо медленнее, и стали приближаться к физически ограниченным значениям.

Последние открытия в области нанoeлектроники, а также прогресс в изучении графена и его свойств говорят о возможности применения в электронных компонентах и интегральных микросхемах. Графен находит применение не только в электронной промышленности, но и в различных отраслях народного хозяйства. Графен может использоваться при создании полевых транзисторов, электродов в суперконденсаторах и т.п.

Последние несколько лет графен активно используется в исследованиях и разработках резонансно-туннельных структур – диодов и транзисторов. Эти структуры обладают рядом преимуществ над аналогичными полупроводниковыми диодами и среди них выделяется частота работы приборов из-за большой подвижности зарядов. Данные электронные компоненты могут использоваться в логических схемах, а значит их применение в вычислительной технике может привести к росту производительности.

В данной диссертационной работе будут рассмотрены резонансно-туннельные структуры на основе графена на подложке диоксида кремния и гексагонального нитрида бора. В ходе научных исследований были проведены моделирования данных структур, получены их зависимости коэффициентов прохождения с различными конфигурациями и параметрами структуры, а также проведен анализ полученных результатов.

Моделирование будет основываться на двух моделях: на численной модели, основанной на решении уравнения Шредингера, и численной комбинированной модели, основанной на решении уравнений Шредингера и Пуассона.

В первой главе будет произведен краткий обзор основных сведений о графене, его свойств. Так же рассмотрим основные структуры на основе графена и их получение.

Вторая глава будет посвящена рассмотрению резонансно-туннельных диодов, описанию их принципа работы. Рассмотрим различные виды структур, полученных за последние несколько лет исследований в этой сфере другими исследователями, в том числе на основе графена.

Как было сказано ранее – в данной диссертационной работе будут

использоваться две численные модели. Я приведу их описание в третьей главе. Так же будет рассмотрен программный комплекс RTS-NANODEV – программное обеспечение, созданное силами сотрудников научно-исследовательской лаборатории 4.1 «Физика приборов микро- и наноэлектроники» БГУИР. Данный комплекс программ использовался для моделирования РТД структур.

Четвертая глава полностью посвящена рассмотрению и анализу результатов моделирования. Моделирование проводилось для трёх- и четырехбарьерных структур с различными параметрами системы.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

В данной работе будут промоделированы и исследованы различные многобарьерные резонансно-туннельные структуры на основе графена. На сегодняшний день исследование резонансно-туннельных структур является одним из перспективных направлений в наноэлектронике. Высокая управляемость характеристиками за счет изменения геометрических параметров структуры и получение огромных значений токов и определяет актуальность темы данной работы.

### **Степень разработанности проблемы**

Исследование графена и его разнообразных свойств представлены в работах К. Новоселова, Ю. Чжана, Р. Нейра, П. Жао и других авторов. Изучение наноструктур на основе графена представлено в работах К. Новоселова, Э. Макканна, А. Пантракова, С. Дас Сармы.

Среди большого числа исследований структур по этой теме необходимо отметить работы С. Ватсона, М. Хейда, М. Асады, С. Сузуки.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертации является исследование влияния физических параметров трехбарьерных и четырехбарьерных резонансно-туннельных структур на основе графена на электрические характеристики структур.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

- исследовать модели для описания резонансно-туннельных структур;
- модифицировать модель Вассела под расчеты трехбарьерных и четырехбарьерных резонансно-туннельных структур на основе графена;
- установить зависимости коэффициентов прохождения (прозрачности) структуры от изменения параметров структуры;
- установить зависимости плотностей токов для исходных структур;
- проанализировать полученные данные;

**Объектом** исследования являются трехбарьерные и четырехбарьерные резонансно-туннельные структуры на основе графена.

**Предметом** работы является исследование влияния геометрических параметров структуры (ширина квантовых барьеров и ям) и электрофизических (высота барьеров) на электрические характеристики структуры.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 01 «Микро- и нанoeлектроника».

#### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли результаты известных исследований российских и зарубежных физиков в области микро- и нанoeлектроники, исследования графена и резонансно-туннельных структур и их применения.

Расчеты по теоретическим моделям осуществлены в пакете RTS-NANODEV. Обработка данных проводилась с использованием OriginLab. Для реализации расчетов для коэффициентов прохождения использовалась программа, написанная на PascalTurbo.

**Информационная база** исследования для теоретического и практического анализа структур сформирована на основе статистических данных.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке и модификации моделей расчета резонансно-туннельных структур на основе графена с различным количеством барьеров.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

- 1.Цели, задачи и актуальность диссертационной работы.
- 2.Модель Вассела и модель основанная на решении одномерного уравнения Шредингера для описания коэффициента прохождения (прозрачности) структуры и расчета плотности тока.
- 3.Экспериментальные закономерности, полученные в среде OriginLab, позволившие наблюдать зависимости влияния геометрических и электрофизических параметров на электрические характеристики структур. Выявленные зависимости позволяют сформулировать рекомендации по созданию оптимальных структур на исследуемых подложках.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в установлении влияния физических параметров (ширина квантовых барьеров, квантовых ям) на электрические характеристики трёх- и четырёхбарьерных резонансно-туннельных структур на основе графена.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что в дальнейшем это можно использовать для проведения научно-исследовательских работ в академических институтах и вузах Республики Беларусь, а также внедрить в учебный процесс.

#### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 2 опубликованных работах, представленных в научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР и международной молодежной научно-технической конференции.

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, и библиографического списка. Общий объем диссертации – 69 страниц. Работа содержит 25 таблиц, 37 рисунков. Библиографический список включает 63 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы внедрения графена в область микро- и наноэлектроники, а именно его применения в электронных компонентах и интегральных микросхемах, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассматриваются графен, его электрофизические свойства и примеры наноструктур на его основе.

Во **второй главе** приведен анализ современного состояния и тенденции развития применения и исследования резонансно-туннельных структур в различных сферах.

В **третьей главе** представлены результаты влияния геометрических параметров структуры (ширина квантовых барьеров и ям) и электрофизических (высота барьеров) на электрические характеристики структуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе были показаны результаты моделирования резонансно-туннельных структур на основе графена на подложках из диоксида кремния и гексагонального нитрида бора. Были рассмотрены трехбарьерные и четырехбарьерные структуры, их зависимости коэффициента прохождения, а также вольт-амперные характеристики. Данные исследования осуществлялись с использованием модели Вассела и самосогласованной численной модели в программном комплексе NANODEV-RTS.

В ходе исследования зависимости коэффициента прохождения структуры выявлено, что с при уменьшении ширины одного барьера, как в случае

трехбарьерных, так и в случае четырехбарьерных структур, коэффициент увеличивается, а смещения по шкале энергий не происходит. При увеличении ширины всех барьеров, в случае трехбарьерных структур, коэффициент прохождения уменьшается, но энергия не изменяется, а в случае четырехбарьерных структур – коэффициент прохождения уменьшается и смещается в сторону меньших энергий. При изменении ширины двух барьеров происходит следующее: при уменьшении ширины двух барьеров, в обеих структурах, происходит увеличение коэффициента прохождения, кроме случая, когда уменьшаются ширины двух крайних барьеров в четырехбарьерных структурах; при увеличении ширины двух барьеров, в аналогичных случаях, происходит обратное, коэффициент прохождения уменьшается, кроме случая, когда увеличиваются ширины двух центральных барьеров в четырехбарьерных структурах, тогда происходит увеличение коэффициента прохождения. При изменении ширины квантовых ям было показано, что изменение ширины только одной из ям, неважно какой, приводит к одинаковым значениям, коэффициент прохождения уменьшается, однако, при общем уменьшении ширины всех квантовых ям приводит к смещению коэффициента прохождения в сторону больших энергий и его увеличению.

В ходе рассмотрения вольт-амперных характеристик стандартных трех- и четырехбарьерных резонансно-туннельных структур на основе графена и на подложках из диоксида кремния и гексагонального нитрида бора, было показано, что области отрицательного дифференциального сопротивления, а также плотность тока находятся выше и больше у подложки из гексагонального нитрида бора, для трехбарьерных структур. Для четырехбарьерных структур, первая и третья области отрицательного дифференциального сопротивления и плотности токов в этих областях, выше у подложки из гексагонального нитрида бора, а вторая область – у подложки из диоксида кремния, однако у структуры на подложке из гексагонального нитрида бора эти области и экстремумы проявляются при больших значениях напряжения.

По материалам проведенных исследований опубликованы статьи «The influence of region sizes on the current-voltage characteristics of graphene-based four-barrier resonant tunneling structures» и «Влияние размеров областей на ВАХ вертикальных гетероструктур на основе графена и гексагонального нитрида бора». Прочитан доклад на 57-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов в апреле 2021 года БГУИР.

### Список опубликованных работ

1. Абрамов И.И., Романова И.А., Поляков И.С. Влияние размеров областей на ВАХ вертикальных гетероструктур на основе графена и гексагонального нитрида бора // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций (РТ-2021): материалы 17-й международной молодежной научно-технической конференции, 11-15 октября 2021 / Севастополь, Россия – 2021 – С. 193
2. Polyakov, I.S. The influence of region sizes on the current-voltage characteristics of graphene-based four-barrier resonant tunneling structures // 57th Scientific Conference of postgraduates, undergraduates and students of BSUIR – Minsk, 2021 – P.116-118

Библиотека БГУИР