

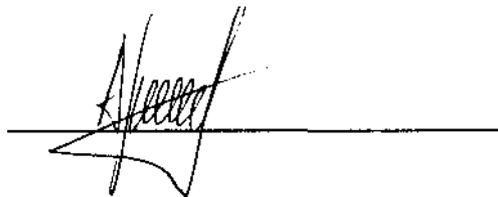
УЖ 621.389

Шабор Александр Александрович

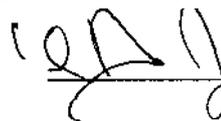
Моделирование резонансно-туннельных диодов на основе графена на
подложке из диоксида кремния

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук по специальности 1-41 80 01
«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»



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



Минск 2019

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 наноэлектроники, 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 диссертационной работе рассмотрены резонансно-туннельные диоды на основе графена на подложке диоксида кремния. В ходе научных исследований было проведено моделирование данных структур, получены их вольт-амперные характеристики диода с различными размерами областей и параметрами, а так же проведен анализ полученных результатов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации. Характеристики современной электроники и электротехники достигают пределов. Ставшие стандартом за многие годы создания электронных компонентов полупроводниковые элементы не дают преимущественного роста параметров, как это было ранее. Например, сверхвысокочастотные полупроводниковые диоды могут работать в микроволновом диапазоне частот вплоть до 300 ГГц. Однако достичь более высоких частот нет возможности, при использовании тех же материалов.

Для преодоления данных ограничений возможно использование графена. В последнее время этот материал усиленно изучается учёным сообществом, и уже получены некоторые результаты применения его при проектировании резонансно-туннельных диодов. Предполагается, что использование графена может увеличить частоту работы электронного прибора до нескольких ТГц.

В различных источниках можно найти статьи специалистов, применяющих графен при создании резонансно-туннельных структур. В статье рецензируемого научного журнала «*Journal of Physics D: Applied Physics*» под авторством V. Hung Nguyen, F. Mazzamuto, A. Bournel, и P. Dollfus под названием «*Resonant tunneling diode based on graphene/h-BN heterostructure*» был представлен резонансно-туннельный диод, представляющий собой структуру из подложки нитрида бора и расположенным на ней графеном. Соотношение токов максимума к минимуму в области отрицательно-дифференциального сопротивления достигало 4 при комнатной температуре.

В рецензируемом междисциплинарном теоретическом и прикладном научно-техническом журнале "Нано- и микросистемная техника" была опубликована статья под авторством И. И. Абрамова, Н. В. Коломейцевой, В. А. Лабунова и И. А. Романовой под названием «*Моделирование резонансно-туннельных диодов на основе графена на подложках различного типа*». В этой статье также были рассмотрены структуры на 2 подложках – из карбида кремния и нитрид бора. Соотношения токов максимума к минимуму в области отрицательно-дифференциального сопротивления также достигало 4.

Таким образом, моделирование резонансно-туннельных диодов (РТД) на основе графена на подложке из диоксида кремния является актуальной задачей. Это может дать необходимую информацию для технических специалистов, которые занимаются проектированием данных структур, а также проектированием, например, высокочастотных генераторов.

Цели и задачи исследования. Целью данной магистерской диссертации следует считать анализ результатов моделирования резонансно-туннельных диодов на основе графена на подложке из диоксида кремния. Под задачами следует считать: моделирование ВАХ РТД на основе графена на подложке из диоксида кремния; получение результатов моделирование и их анализ.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования будем считать резонансно-туннельный диод, а предметом исследования - полученные в результате моделирования вольт-амперные характеристики.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

Проведено моделирование ВАХ двух- и трехбарьерных РТД для различных температур и геометрических размеров областей.

В результате проведенного анализа было установлено, что наибольшая контрастность (отношение максимального тока к минимальному на участке отрицательно-дифференциального сопротивления) ВАХ равная 7,3 получена при моделировании двухбарьерного РТД на основе графена на подложке из диоксида кремния со следующими параметрами структуры: температура окружающей среды - 100 К, высота потенциальных барьеров - 3,5 эВ; ширина всех барьеров - 1,0 нм; ширина квантовых ям между потенциальными барьерами - 2,5 нм;

Исследование трёхбарьерных РТД на основе графена на подложке из диоксида кремния показало, что максимальная контрастность ВАХ, равная 22,58 наблюдается у диодов со следующими параметрами структуры: высота потенциальных барьеров - 3,5 эВ; ширина барьеров - 1,4 нм; ширина квантовых ям - 3,4 нм; температура окружающей среды - 100 К.

Личный вклад соискателя. В диссертации представлены результаты моделирования и анализа полученных данных, выполненных самим автором. Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, разработке методов их решения, в обработке, анализе, обобщении полученных результатов.

Апробация результатов диссертации. Научные результаты данной магистерской диссертации могут в дальнейшем использоваться на предприятиях радиоэлектронной промышленности для проектирования и разработки высокочастотных схем и электронных компонентов.

Структура и объем диссертации. Объем диссертационной работы – 71 страница. Введение и заключение присутствует. Количество глав – 4, среди них: «Графен. Обзор структур на основе графена. Теоретические исследования» где вкратце будет рассмотрена основная информация о графене и его структурах; «Резонансно-туннельные диоды» - в данной главе будут рассмотрены принципы работы резонансно-туннельных

диодов, и их виды, в том числе на графене; «Моделирование приборных структур микро- и наноэлектроники» - краткое описание программного комплекса и численных моделей, используемых в работе; «Результаты моделирования» - будут рассмотрены и проанализированы результаты моделирования. Количество источников использованной литературы – 73. Количество таблиц – 34. Количество рисунков – 29.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертации рассмотрены 3 типа структур: двух-, трёх- и четырёхбарьерные структуры. Их моделирование проводилось с использованием комплекса программ NANODEV-RTS, созданным сотрудниками научно-исследовательской лаборатории 4.1 БГУИР под руководством И. И. Абрамова. Это программное обеспечение основывается на трех блоках: первый – производит вычисления ВАХ резонансно-туннельных структур (РТС) на основе большого числа моделей, второй – для схематехнического моделирования, а третий – для анализа физических процессов, протекающих в моделируемых резонансно-туннельных структурах. Этот комплекс программ включает в себя различные подходы, методы и модели к анализу структур. Одной из главных частей данного комплекса программ является блок численного моделирования структур. Быстрое и детальное моделирование может осуществляться при использовании огромного числа моделей, характеризующихся разной степенью точности и эффективности, так как каждая модель обладает как достоинствами, так и недостатками. В диссертационной работе будет рассчитываться ВАХ РТС исходя из следующих исходных данных: форма потенциальных барьеров, число областей, внешние воздействия.

Модели, включенные в комплекс основаны на использовании метода матриц переноса. Стоит отметить, что в данном программном обеспечении реализована модель, основанная на численном самосогласованном решении уравнения Шредингера и Пуассона в одномерном случае. Используемые при моделировании модели основаны на решении уравнения Шредингера в каждой области структуры с последующей «сшивкой» волновых функций и их первых производных на границах областей.

Моделирование двухбарьерных структур осуществлялось с использованием 2 математических моделей: численной модели, основанной на решении уравнения Шредингера, и численной комбинированной модели, основанной на решении уравнений Шредингера и Пуассона. Моделирование трёх- и четырёхбарьерных структур осуществлялось с использованием только самосогласованной численной модели. В этой модели учитывается туннелирование носителей заряда в зоне проводимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе был выполнен анализ вольт-амперных характеристик, полученных в результате моделирования.

Было показано, что для двухбарьерных резонансно-туннельных диодов на основе графена на подложке из диоксида кремния характерен один участок отрицательно-дифференциального сопротивления. Для структуры с малыми размерами потенциальных барьеров и квантовых ям, рассчитанных при температуре 100 К соотношение максимального тока к минимальному на участке отрицательно-дифференциального сопротивления, равняется 7,3.

Также было показано, что для трёхбарьерных резонансно-туннельных диодов на основе графена на подложке из диоксида кремния характерно наличие двух участков с отрицательно-дифференциальным сопротивлением. Особый интерес представляет структура с малыми размерами потенциальных барьеров и квантовых ям, рассчитанных при температуре 100 К, также, как и в двухбарьерной. На первом участке отрицательно-дифференциального сопротивления соотношение максимального тока к минимальному составило 3,46. На втором участке – соотношение равняется 22,58.

В четырёхбарьерных структурах появляется третий участок отрицательного дифференциального сопротивления. Что характерно, значения тока для структуры с температурой 100 К выше, чем для структуры с температурой в 300 К.

Полученные результаты позволяют использовать их в дальнейшем при разработке высокочастотных схем и электронных компонентов, а значит это может дать существенный эволюционный толчок в развитии микроэлектронной отрасли.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] Романова, И. А. Моделирование двухбарьерных РТД на основе графена на подложке диоксида кремния / И. А. Романова, Н. В. Коломейцева, И. Ю. Щербакова, А. А. Шабор // Материалы 14-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ – 2018». – 2018. – С. 151.