

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

УДК 621.384

Щукин
Евгений Андреевич

Моделирование двухзатворных полевых транзисторов на основе графена

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 03 нанотехнологии и наноматериалы
(в электронике)

Научный руководитель
Абрамов Игорь Иванович
доктор физико-математических наук
профессор кафедры микро- и
наноэлектроники

Минск 2019

ВВЕДЕНИЕ

Графен представляет собой слой атомов углерода, соединенных в гексагональную двумерную кристаллическую решетку. Это, по сути, пленка углерода толщиной в один атом, имеющая строго упорядоченную кристаллическую структуру. Слой графина обладает рядом ценных свойств: отличается высокой стабильностью, в т.ч. и при комнатной температуре, а также высокой тепло- и электропроводностью. Подвижность электронов в графене в 10—20 раз выше, чем в арсениде галлия. Из этого материала можно создавать чипы, пригодные для работы на терагерцовых частотах.

Первый графеновый транзистор был создан в 2007 г. На базе отлаженной КМОП-технологии. Благодаря этой технологии дальнейшим прогресс в изготовлении графеновых МОП-транзисторов был очень быстрым. В качестве проводящего канала использовался графен, полученный микромеханическим отщеплением, эпитаксиальный графен или CVD-графен, выращенный на металлических подложках.

Такие транзисторы имеют типичную вольт-амперную характеристику. Графен является бесщелевым полупроводником, поэтому концентрация носителей заряда и их тип в проводящем канале определяются напряжением затвора. Достаточно большое положительное напряжение затвора приводит к накоплению электронов в канале, и образуется канал n-типа, а при отрицательном напряжении на затворе получается канал p-типа. Отсюда вытекает, что для таких биполярных приборов имеются соответствующие этим типам каналов два участка в зависимости тока у стока от напряжения на затворе, разделённых минимумом, соответствующим дираковской точке.

В диссертационной работе рассмотрены двухзатворные полевые транзисторы на основе графена. Разработано программное обеспечение для упрощенной модели передаточных характеристик полевых транзисторов на однослойном графене. В ходе научных исследований было проведено моделирование данных структур, получены их выходные и передаточные характеристики с различными параметрами, а так же проведен анализ полученных результатов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации. В настоящее время графен является перспективным материалом для нанoeлектроники. Он обладает уникальными электронными и высокочастотными свойствами, благодаря которым данный материал, по-видимому, может служить заменой кремнию. Перспективным является разработка графеновых транзисторов. Таким образом, моделирование двухзатворного полевого транзистора на основе графена является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования

Цель работы – разработка программного обеспечения упрощенной модели ПГТ, предназначенной для моделирования передаточных характеристик ПГТ, а также проведение расчетов и анализ результатов моделирования двухзатворных полевых транзисторов на основе графена.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение анализа существующих теоретических и экспериментальных исследований двухзатворного полевого транзистора на основе графена.
2. Разработка программного обеспечения упрощенной модели двухзатворного ПГТ для моделирования передаточных характеристик.
3. Моделирование вольт-амперных характеристик двухзатворного полевого транзистора на основе графена.
4. Анализ полученных данных.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – графеновый двухзатворный полевой транзистор, а предмет исследования – полученные в результате моделирования выходные и передаточные характеристики.

Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики

Работа выполнялась в рамках ГБЦ №16-3120 «Физико-топологическое моделирование электрических характеристик полевых транзисторов на основе графена» задание 3.2 ГПНИ «Конвергенция», 2016 – 2020 годы, подпрограммы «Объединение», утвержденной на кафедре микро- и нанoeлектроники.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Описание разработанного программного обеспечения упрощенной модели ПГТ, предназначенной для моделирования передаточных характеристик ПГТ.

2. Анализ результатов моделирования выходных характеристик двухзатворных полевых транзисторов на основе графена.
3. Анализ полученных результатов моделирования передаточных характеристик двухзатворных полевых транзисторов на основе графена.

Личный вклад соискателя

Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Аналитическое исследование существующих теоретических и экспериментальных исследований двухзатворного полевого транзистора на основе графена проводилось соискателем лично. Разработка программного обеспечения упрощенной модели двухзатворного ПГТ для моделирования передаточных характеристик проводилась совместно с научным руководителем доктором физико-математических наук Абрамовым И.И.

Апробация результатов диссертации. Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы, а также результаты прикладных исследований и разработок были доложены на 54-й научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов БГУИР, 2018.

Публикации. Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 2 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций (см. список опубликованных работ).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырёх глав, заключения и списка использованных источников, включающего 60 наименований. Общий объем диссертации составляет 51 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертации рассмотрены двухзатворные ПГТ с различными подзатворными диэлектриками. Их моделирование проводилось с использованием комплекса программ NANODEV, созданным сотрудниками научно-исследовательской лаборатории 4.1 БГУИР под руководством И. И. Абрамова. Один из блоков комплекса Nanodev-GFET предназначен для моделирования полевых графеновых транзисторов. Это программное обеспечение основывается на двух блоках: первый – производит вычисления выходных и передаточных ВАХ ПГТ на основе упрощенной модели, второй – расчет на основе самосогласованной комбинированной модели. Используемый при моделировании в данной диссертационной работе комплекс программ является следующей версией системы NANODEV,

применяемой при разработке и моделировании наноэлектронных приборов, в частности, блока программ моделирования ПГТ.

Быстрое и детальное моделирование может осуществляться при использовании упрощенной и самосогласованной моделей, характеризующихся разной степенью точности и эффективности, так как модели обладают как достоинствами, так и недостатками. В диссертационной работе рассчитываются выходные и передаточные характеристики ПГТ исходя из следующих исходных данных: длина и ширина канала, толщина слоев диэлектриков для верхнего и нижнего затвором, подвижность электронов и дырок в графене, диэлектрические проницаемости подзатворного диэлектрика для верхнего и нижнего затворов, скорость Ферми в монослое графена, неоднородность электростатического потенциала, энергия оптических фононов, прикладываемые к прибору напряжения, температура окружающей среды, сопротивление стока и истока, напряжения Дирака для верхнего и нижнего затворов.

Модели, включенные в комплекс, основаны на использовании диффузионно-дрейфовой модели. Моделирование двухбарьерных структур осуществлялось с использованием упрощенной комбинированной модели двухзатворного ПГТ, сочетающей элементы физико-топологической и электрической моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе был выполнен анализ выходных и передаточных характеристик, полученных в результате моделирования.

На основе упрощенной модели выходных характеристик и алгоритма, учитывающего влияние сопротивлений истока и стока на ВАХ ПГТ, разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать передаточные характеристики.

С помощью упрощенных моделей выходных и передаточных характеристик исследованы двухзатворные структуры полевых транзисторов на основе однослойного графена с различными подзатворными диэлектриками.

Было показано, что при увеличении толщины подзатворного диэлектрика, длины канала, сопротивления на стоке и истоке и напряжения на верхнем затворе выходной ток уменьшается. На рисунках 4.10 и 4.11 заметно искривление выходной характеристики при подаче на верхний затвор напряжения в 2 В. Это вызвано изменением типа проводимости в графене.

Также было показано, что при увеличении толщины подзатворного диэлектрика точка Дирака смещается вправо (рисунки 4.15 и 4.16), а при увеличении длины канала точка Дирака смещается влево (рисунки 4.17 и 4.18). На рисунке 4.19 наблюдается ситуация, что при увеличении напряжения на стоке точка электронейтральности смещается вправо, а при уменьшении температуры наоборот вправо (рисунок 4.22).

Полученные результаты качественно и количественно соответствуют экспериментальным данным, что подтверждает адекватность разработанной модели и предложенного программного обеспечения.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Коломейцева Н. В., Романова И. А., Щербакова И. Ю., Шендер Д. А., Щукин Е. А. Алгоритмы реализации модели полевых транзисторов на основе однослойного графена // Материалы 14й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ-2018», 22-26 октября 2018, Россия, Севастополь. – 2018. – с. 150.

2. Щукин, Е. А. Влияние температуры окружающей среды на выходные характеристики двухзатворных полевых транзисторов на основе однослойного графена / Абрамов И. И., Щукин Е. А. // 54-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов. – 2018.