

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

УДК 004.942

Ермак  
Владислав Олегович

Вольт амперные характеристики полевых транзисторов на графене с различными подзатворными диэлектриками: результаты теоретического моделирования

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра  
по специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы»

Научный руководитель  
докт. физ-матем. наук, профессор  
Абрамов И.И.

Минск 2023

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: **Голосов Дмитрий Анатольевич,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
электронной техники и технологии  
учреждения образования «Белорусский  
государственный экономический  
университет»

Защита диссертации состоится «24» января 2023 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

В последние десятилетия научный и практический интерес переходит от  $3D$  материалов к  $2D$  материалам, от твердотельной электроники к гибкой электронике. Графен находится в центре постоянно расширяющейся области исследований. Оптические, электрические и механические свойства графена идеально подходят для создания микро- и наномеханических систем, прозрачных и проводящих электродов и фотоники.

Как двумерный материал с сотовой структурой, графен привлек огромный интерес благодаря своим уникальным свойствам с момента своего дебюта в 2004 году. Его уникальные физические, механические и электрические свойства вызвали большой интерес среди ученых. Графен не только обладает превосходными оптоэлектронными и механическими свойствами, но также может обеспечить хорошую адгезию с несколькими органическими материалами для получения высокоэффективных органических полевых транзисторов.

По сравнению с обычными полупроводниками, такими как кремний, графен демонстрирует совершенно другие свойства, например, это полупроводник с нулевым перекрытием с очень высокой электропроводностью, а его проводимость и валентные зоны встречаются в точке Дирака. Для полупроводников поток электричества требует некоторых видов активации (например, поглощения тепла или света), чтобы преодолеть зазор между валентной зоной и зоной проводимости. Если полупроводник активируется внешним электрическим полем для включения и выключения, то он называется полевыми транзисторами (МОП-транзисторами).

Графен по сравнению с известными полупроводниковыми материалами обладает рядом уникальных свойств, что позволяет на его основе создавать перспективные приборные структуры наноэлектроники [1].

Одной из таких структур является полевой графеновый транзистор (ПГТ). На основе графена созданы экспериментальные образцы полевых транзисторов различных конструкций.

Главным недостатком однослойного графена является отсутствие запрещенной зоны, вследствие чего в полевых транзисторах на однослойном графене отношение токов открытого и закрытого состояний очень мало.

Одним из возможных путей решения этой проблемы может быть использование различных конфигураций графеновых полевых транзисторов. К сожалению, без моделей ПГТ их разработка и оптимизация, следовательно, широкое внедрение в практику будут практически невозможны.

Модель полупроводниковых устройств, являясь связующим мостом между производителями полупроводников и разработчиками схем, играет решающую роль в полупроводниковой промышленности. С развитием технологии КМОП, которая приносит множество новых физических эффектов, модель полупроводниковых устройств быстро развивалась. В настоящее время разработчики интегральных схем (ИС) используют различные виды программного обеспечения (такие как *SPICE*, *SLIC*, *PHILIPAC*) при проектировании схем. Ядром соответствующего программного обеспечения является модель каждого устройства блока. Потому что интегральная схема включает в себя множество транзисторов, если все единичные устройства используют сложную модель транзистора, моделирование на системном уровне выйдет за рамки возможностей компьютера и, следовательно, приведет к несходимости в расчетах. С другой стороны, модель транзистора может точно описать его физические свойства, чтобы обеспечить надежность рассчитанного результата.

Целью данной диссертации является исследование влияния конструктивно-технологических факторов на выходные характеристики полевых транзисторов на графене с различными подзатворными диэлектриками.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверен в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет 75%. Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Списке использованных источников». Результат проверки дипломного проекта на оригинальность приведен в приложении А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы магистерской диссертации.**

Актуальность предлагаемой работы заключается в том, что из-за физических ограничений кремния, в микроэлектронике требуются новые материалы. Графен и приборы микроэлектроники с использованием графена является перспективным направлением развития, а моделирование полупроводниковых устройств на графене позволит ускорить и удешевить, процесс разработки и производства новых графеновых транзисторов.

### **Цель и задачи исследования.**

Целью работы является создание моделей ПГТ с различными конструктивно-технологическими параметрами и выявление их закономерностей. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать и реализовать модель для расчёта выходных характеристик с высокой степенью соответствия с реальными выходными характеристиками;
- изучить выходные характеристики рассчитанных образцов рассчитанные с помощью полученной модели;
- выявить закономерности, ведущие к улучшению выходных характеристик транзистора.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются полевые графеновые транзисторы с различными конструктивно-технологическими параметрами. Предметом исследования являются выходные вольт -амперные и передаточные характеристики полевых графеновых транзисторов при различных параметрах.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы».

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

Существенное различие физики функционирования полевых транзисторов на основе полупроводниковых материалов и полевых графеновых транзисторов обусловило необходимость создания моделей именно для ПГТ. Принципиальное отличие наглядно проявляется на передаточных характеристиках ПГТ, имеющих области дырочной проводимости слева от точки Дирака и электронной проводимости справа от точки Дирака. В последние годы моделям графеновых полевых транзисторов, а также получению экспериментальных образцов этих приборов посвящено большое число работ, что, в частности, отражено в обзоре по компактным моделям ПГТ.

**Информационная база** исследования заключается в определении параметров и материалов, оказывающих наибольшее влияние на выходные характеристики полевого графенового транзистора, что очевидно будет важным при изготовлении приборов.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в моделировании полевых графеновых транзисторов с каналом из однослойного графена и получении их выходных вольт -амперных и передаточных характеристик.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующий основной результат:

Разработана методика моделирования полевых графеновых транзисторов с различными конструктивно-технологическими параметрами. При анализе полученных результатов выявлены параметры, оказывающие наибольшее положительное влияние на выходные характеристики транзисторов на графене, что позволяет использовать полученные результаты при разработке и производстве полевых графеновых транзисторов.

**Практическая значимость** заключается в том, что полученные модель и результаты, могут быть широко использованы при производстве и разработке новых моделей ПГТ.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Программа расчётов и расчёт выходных характеристик сделаны соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем были выявлены зависимости выходных характеристик от конструктивно-технологических параметров полевого графенового транзистора. Анализ результатов расчётов и создание числовой модели проводились совместно с научным руководителем доктором физика-математических наук Абрамовым И.И.

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в трех опубликованных работах общим объемом 4,0 п.л. (авторский объем 4,0 п.л.), представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 30 наименований. Общий объем диссертации составляет 57 страниц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы создания новых полевых графеновых транзисторов, 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** приведены результаты обзора научно-технической литературы по теме диссертационной работы. В ней рассмотрены основные характеристики материалов, а также описаны способы их получения. По итогу главы определены основные характеристики материала, принцип создания полевых графеновых транзисторов и проблемы, возникающие при их производстве.

**Во второй главе** рассмотрен принцип работы конечных изделий. По итогу главы определены основные характеристики прибора и методика проведения расчётов и оценки структурных и электрофизических параметров прибора.

**В третьей главе** содержатся результаты проведения расчётов выходных характеристик полевого графенового транзистора, графики выходных и передаточных характеристик полевого графенового транзистора при различных конструктивно-технологических параметрах. Сделан вывод о возможности применения выбранного метода при разработке и исследовании структур микроэлектроники на основе графена.

**В приложениях** приведена проверка на антиплагиат.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание и реализация моделей элементов интегральных схем представляют собой сложную задачу, связанную с разработкой теоретических (физических) представлений об исследуемом элементе, а также ее «машинную» реализацию. Крайне важную роль играют результаты моделирования, а точнее их соответствие экспериментальным данным. В зависимости от этого модель может с определенной степенью адекватности описывать происходящие в приборе физические явления, ибо абсолютно невозможно создать, а самое главное, реализовать модель, которая бы учитывала абсолютно все эффекты. Упрощенные модели позволяют описать прибор, опираясь на самые значимые теоретические законы, и позволяют получать предварительную информацию об исследуемой структуре, описывая принцип работы прибора.

Представленные в работе результаты моделирования показывают, как влияют различные конструктивно-технологические параметры на вид вольт-амперной характеристики исследуемой структуры.

Проведены теоретические исследования различных структур ПГТ. С помощью построенной модели исследованы характеристики двухзатворного ПГТ на основе однослойного графена на подложке  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  при различных напряжениях на верхнем затворе, а также при различной ширине графена. Результаты (ВАХ выходных характеристик исследуемых ПГТ), полученные с помощью модели, согласуются качественно либо с результатами расчета по известным моделям, либо с экспериментальными данными. Исследовано влияние различных факторов на вольт-амперные характеристики приборов. С ее применением исследованы выходные и передаточные вольт-амперные характеристики ПГТ в зависимости от различных факторов, а именно: толщины диэлектриков, длин каналов, прикладываемых напряжений, температуры окружающей среды, сопротивлений стока и истока, различных параметров модели.

Адекватность разработанных моделей и программного обеспечения подтверждена согласованием результатов расчета выходных (стоковых) и передаточных (сток-затворных) ВАХ с экспериментальными данными для однозатворных и двухзатворных ПГТ.



## СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

- 1** – Влияние подзатворного диэлектрика на характеристики полевых транзисторов на графене / Ермак В. О. // Радиотехника и электроника : сборник тезисов докладов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, апрель 2022 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2022. – С. 60–61.
- 2** – Влияние толщины барьеров при моделировании характеристик РТД на основе GaN/AlGaN с вертикальным транспортом / Абрамов И.И., Ермак В.О. [и др.] // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций (РТ – 2022): материалы 18-й международной молодежной научно-технической конференции, Севастополь, 2022 – С. 186.
- 3** – Расчет выходных характеристик полевых транзисторов на основе двухслойного графена / Коломейцева Н.В., Абрамов И.И., Ермак В.О., Щербакова И.Ю. // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций (РТ – 2022): материалы 18-й международной молодежной научно-технической конференции, Севастополь, 2022 – С. 187.