

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

УДК 621.382.323

Мельникова
Виолетта Валентиновна

Зарядовые свойства транзисторных структур на основе
двумерных кристаллов

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра
по специальности 1-41 80 01 «Микро- и нанoeлектроника»

Данилюк Александр Леонидович
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры МНЭ БГУИР

Минск 2023

ВВЕДЕНИЕ

В электронике долгие годы доминирует кремниевая технология, что обусловлено физическими свойствами кремния, его распространённостью и технологичностью. При этом прогресс обеспечивается в первую очередь уменьшением проектных норм элементов. Поскольку масштабирование само по себе обеспечивало достаточное увеличение производительности интегральных схем от поколения к поколению, у производителей отсутствовала необходимость разрабатывать приборы, основанные на новых физических принципах, или искать материалы для замены кремния. Однако сейчас все сходятся во мнении, что масштабирование подошло к своему пределу. В современных транзисторах массового производства длина канала может составлять 22 нм, разрабатываются техпроцессы вплоть до 11 нм. Необходимость дальнейшего роста производительности заставляет искать новые материалы с лучшими электронными свойствами.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации.

Исследования зарядовых эффектов в двумерных кристаллах в настоящее время является весьма актуальным в связи с достижениями современной технологии и перспективами применения таких кристаллов для создания транзисторов с повышенной эффективностью и быстродействием. 2D-полупроводники, такие как дисульфид молибдена и диселенид вольфрама, приобрели большой интерес как материалы транзисторных каналов в цифровых приложениях из-за их толщины атомного масштаба и соответствующих запрещенных зон, которые являются весьма желательными свойствами для маломощных транзисторов с полевым эффектом в будущих технологических реализациях. Параллельно с экспериментальными и физическими методами необходимы компактные работы по моделированию, чтобы проложить путь для изучения схем и широкомасштабных приложений таких 2D-полевых транзисторов.

Степень разработанности проблемы

С точки зрения применения, любая двумерная модель полевого транзистора, которая учитывает только внутренние характеристики, редко согласуются с реальной производительностью устройства. Следует учитывать эффекты, которые имеют решающее значение для 2D-материалов, чтобы сделать модели полезными и актуальными для разработчиков

интегральных схем. В настоящее время компактная модель 2D полевого транзистора, которая является строгой и стандартизированной с точки зрения математической процедуры, совместимой с отраслевой конвенцией, самосогласованной с точки зрения физики, всеобъемлющей с точки зрения практических проблем и откалиброванной с экспериментальными результатами, все еще отсутствует.

Одним из недостатков теоретических моделей транзисторных структур с двумерными каналами, представленных в современной литературе, является неполное рассмотрение взаимосвязей электрофизических параметров, существенно влияющих на их электрические характеристики. Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе модификации интегрального выражения для концентрации носителей заряда и уравнения электронейтральности транзисторной гетероструктуры.

Цели и задачи исследования.

Цель работы: состоит в моделировании зарядовых свойств транзисторной структуры, содержащей в качестве канала двумерный полупроводник, а также исследование взаимовлияния электрофизических параметров такой транзисторной структуры.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

- Анализ электронных свойств и транспорта носителей заряда в двумерных кристаллах.
- Разработка методики моделирования зарядовых свойств и электрических параметров транзисторной структуры с двумерным каналом.
- Проведение моделирования зарядовых свойств и эффектов слабой локализации транзисторной структуры с двумерным каналом.

Объектом исследования является транзисторная гетероструктура полевой электрод/ диэлектрик/ двумерный кристалл/подложка.

Предметом исследования являются закономерности электрофизических параметров и эффекты слабой локализации.

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

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты предыдущих исследований отечественных и зарубежных ученых в области моделирования

графеновых транзисторов и транзисторных структур с каналами из двумерных кристаллов.

Математические расчеты по теоретической модели электрофизических параметров транзисторной структуры осуществлены в пакете MathCad. Обработка полученных проводилась с использованием пакета Origin.

Информационная база исследования для интерпретации полученных результатов сформирована на основе расчетных данных.

Научная новизна диссертационной работы заключается в модификации модели для расчета электрофизических параметров гетероструктуры металл/диэлектрик/двумерный кристалл/подложка на основе интегрального выражения для концентрации носителей заряда и уравнения электронейтральности гетероструктуры, а также получении новых закономерностей, определяющих самосогласованную взаимосвязь электрофизических параметров такой гетероструктуры.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

Квантовая емкость, емкость канала и емкость затвора транзисторной структуры с двумерным каналом при постоянных емкостях подзатворного диэлектрика и интерфейса определяются только зарядом канала и не зависят от ширины запрещенной зоны. Отношения емкостей затвора и канала к емкости подзатворного диэлектрика носят нелинейный характер и существенно зависят от потенциала полевого электрода. Такие взаимосвязи объясняются наличием синхронного изменения заряда канала и его электрохимического потенциала при изменении емкости подзатворного диэлектрика, емкости интерфейсных состояний и ширины запрещенной зоны двумерного полупроводника. Такая синхронность вызвана самосогласованием концентрации носителей заряда и электрохимического потенциала, обусловленного условием электронейтральности транзисторной структуры (опубликовано в сб. науч. тр. X Междунар. науч. конф. «Материалы и структуры современной электроники», Минск, 2022).

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что в ней предложен подход к анализу взаимосвязей электрофизических параметров транзисторной гетероструктуры с двумерным каналом, основанный на синтезе интегрального выражения для концентрации носителей заряда и уравнения электронейтральности гетероструктуры, что позволило выявить наличие синхронного изменения заряда канала и его электрохимического потенциала при изменении емкости подзатворного диэлектрика, емкости интерфейсных состояний и ширины запрещенной зоны двумерного полупроводника.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что полученные взаимосвязи электрофизических параметров транзисторной гетероструктуры с двумерным каналом служат основой для моделирования электрических характеристик двумерных транзисторов.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных конференциях: 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, X Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» (БГУ, 2022), XII Международной научной конференции «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (ФНСКС-2022, ИТМО), XX Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» (БГУИР, 2022), а также опубликованы в виде соответствующих тезисов и материалов конференций.

Публикации

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в четырех опубликованных работах общим объемом 0.6 п.л. (авторский объем 0.6 п.л.).

Структура и объем диссертации. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 64 страницы. Работа содержит 3 таблицы, 27 рисунков. Библиографический список включает 30 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы разработки транзисторов с каналами из двумерных кристаллов, 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 описаны свойства носителей заряда в графене, графеновые транзисторные структуры, структурные особенности графеновых полевых транзисторов. Рассмотрены вольт-амперные характеристики графенового полевого транзистора, а также 2D туннельные полевые транзисторы с использованием структур $WSe_2 / SnSe_2$. Описаны модели плотности носителей и тока канала для однослойных графеновых полевых транзисторов.

Во второй главе рассмотрена методика моделирования и оценки электрофизических параметров и вольт-амперных характеристик полевой транзисторной структуры, рассмотрена математическая модель электрофизических параметров гетероструктуры металл/диэлектрик/двумерный кристалл, которая позволяет получить в аналитическом виде зависимость электрохимического потенциала от напряжения на затворе, а также рассмотрено влияние на электрофизические параметры транзисторной структуры с двумерным полупроводниковым каналом ширины запрещенной зоны материала канала, емкости подзатворного диэлектрика, емкости поверхностных состояний в зависимости от потенциала полевого электрода.

В третьей главе исследуется влияние свойств межфазных границ на электрофизические параметры полевых транзисторных структур. Рассмотрены зависимости химического потенциала и концентрации электронов от потенциала полевого электрода для транзисторной структуры с каналом из двумерного кристалла при различной ширине запрещенной зоны и плотности поверхностных состояний. Установлена зависимость заряда канала из двумерного кристалла от его электрохимического потенциала при различной ширине запрещенной зоны.

В четвертой главе представлены результаты моделирования зарядовых свойств транзисторных структур на основе двумерных кристаллов, рассмотрена электростатика графеновой транзисторной структуры. Выявлены взаимосвязь электрофизических параметров транзисторной структуры с двумерным каналом. Установлены закономерности влияния потенциала полевого электрода, ширины запрещенной зоны двумерного полупроводника, емкости подзатворного диэлектрика и емкости интерфейсных состояний на электрохимический потенциал и заряд канала, его квантовую емкость, емкость затвора и емкость канала. Показано, что квантовая емкость, емкость канала и емкость затвора при постоянных емкостях подзатворного диэлектрика и интерфейса определяются только зарядом канала и не зависят от ширины запрещенной зоны.

Изучены закономерности проявления слабой локализации и антилокализации в графене с усиленным спин-орбитальным взаимодействием. Установлены параметры, характеризующие проявление слабой локализации, антилокализации и кроссовера между ними.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Развита математическая модель для расчета электрофизических параметров гетероструктуры металл/диэлектрик/двумерный кристалл/подложка на основе интегрального выражения для концентрации носителей заряда и уравнения электронейтральности гетероструктуры.

2 Рассмотрены взаимосвязи электрофизических параметров транзисторной структуры с каналом из двумерного полупроводника. Установлены закономерности влияния потенциала полевого электрода, ширины запрещенной зоны двумерного полупроводника, емкости подзатворного диэлектрика и емкости интерфейсных состояний на электрохимический потенциал и заряд канала, его квантовую емкость, емкость затвора и емкость канала.

3 Показано, что квантовая емкость, емкость канала и емкость затвора при постоянных емкостях подзатворного диэлектрика и интерфейса определяются только зарядом канала и не зависят от ширины запрещенной зоны. Установлено, что отношения емкостей затвора и канала к емкости подзатворного диэлектрика носят нелинейный характер и существенно зависят от потенциала полевого электрода.

4 Установленные взаимосвязи объясняются наличием синхронного изменения заряда канала и его электрохимического потенциала при изменении емкости подзатворного диэлектрика, емкости интерфейсных состояний и ширины запрещенной зоны двумерного полупроводника. Такая синхронность вызвана самосогласованием концентрации носителей заряда и электрохимического потенциала, обусловленного условием электронейтральности транзисторной структуры.

5 Изучены закономерности проявления слабой локализации и антилокализации в графене с усиленным спин-орбитальным взаимодействием. Установлены параметры, характеризующие проявление слабой локализации, антилокализации и кроссовера между ними.

Список опубликованных работ

- [1-А] Мельникова В.В. Зарядовые свойства гетероструктуры графен/диэлектрик/ кремний. 58-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2022 г. Радиотехника и электроника. Сборник тезисов докладов. Апрель 2022. Минск, БГУИР. – С. 38-40.
- [2-А] Мельникова В.В., Подрябинкин Д.А., Данилюк А.Л. Электростатика графеновой транзисторной структуры. Технические средства защиты информации: тез. докл. XX Белорусско-российской науч.-техн. конф. (Республика Беларусь, Минск, 7 июня 2022 года) / редкол.: Т. В. Борботько [и др.]. – Минск: БГУИР, 2022. – С. 71.
- [3-А] Взаимосвязь электрофизических параметров транзисторной структуры с двумерным каналом / Д. А. Подрябинкин, В. В. Мельникова, А. Л. Данилюк // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.].— Минск: БГУ, 2022.— С. 503—508.
- [4-А] В.А. Зайцев, Д.А. Подрябинкин, В.В. Мельникова, А.Л. Данилюк, С.Л. Прищепа. Слабая локализация и антилокализация в двумерных материалах/ Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах. Сборник научных статей (часть 2) // Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, 2022. - С.76-82.