

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Объект авторского права
УДК 621.382.323

ВОЛЧЁК
Владислав Сергеевич

**СТРУКТУРЫ И ПРИБОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ
С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ
НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ
С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника,
приборы на квантовых эффектах

Минск 2024

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель

Стемпичкий Виктор Романович, кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты

Смирнов Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Устройства обработки и отображения информации» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Соловьёв Ярослав Александрович, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-технического центра – заведующий лабораторией открытого акционерного общества «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Оппонирующая организация

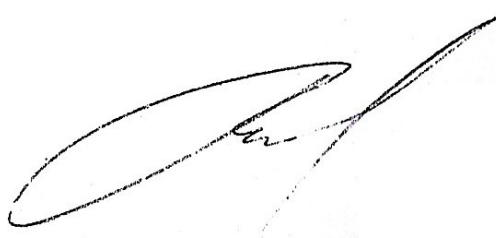
Белорусский национальный технический университет

Защита состоится 26 декабря 2024 г. в 11:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375172938989.

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

Автореферат разослан 26 ноября 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



Г.А. Пискун

ВВЕДЕНИЕ

Твердотельная силовая электроника, базовыми элементами которой являются силовые полупроводниковые приборы, интенсивно развивается с середины XX века. Силовые приборы на основе широкозонных полупроводников, в том числе нитридов элементов третьей группы, постепенно вытесняют устаревающие кремниевые аналоги. Повышенный интерес к системе материалов (Al,Ga)N обусловлен высокой скоростью электронов при насыщении, высокой напряженностью электрического поля пробоя, температурной стабильностью и радиационной стойкостью.

Перспективным полупроводниковым прибором силовой и сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники является реализованный на основе нитридов элементов третьей группы транзистор с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ, англ. *high electron mobility transistor, HEMT*), который за счет высоких значений концентрации и подвижности носителей в канале, а также минимальной входной емкости обладает улучшенными электрическими и частотными характеристиками по сравнению с кремниевыми аналогами.

Развитие технологии ТВПЭ на основе нитридов элементов третьей группы требует решения ряда критических проблем, одной из которых является эффект саморазогрева. Перечисленные выше свойства системы материалов (Al,Ga)N позволяют транзистору выдерживать экстремальные значения выходной плотности мощности, при которых, однако, у границы затвора со стороны стока образуется зона с высокой температурой, что приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик. Таким образом, важными фундаментальными и практическими задачами в области технологии ТВПЭ являются исследование физических процессов, протекающих при возникновении эффекта саморазогрева, выбор подходящего материала с высокой теплопроводностью и разработка на его основе системы теплоотвода, которая обеспечит минимизацию описанного эффекта. Среди требований, предъявляемых к системе теплоотвода, необходимо также отметить достаточный уровень производственной технологичности. Возможное решение в этом случае – применение графена и нитрида бора.

Эффективным инструментом для решения поставленных задач служит компьютерное моделирование в рамках классической диффузионно-дрейфовой теории и термодинамически строгой модели саморазогрева.

Данная диссертационная работа посвящена решению проблем, связанных с повышением быстродействия, снижением потерь энергии и улучшением надежности ТВПЭ, сформированных на основе нитридов элементов третьей группы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации утверждена приказом ректора учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» от 31.12.2015 № 622-О, уточнена по результатам предварительной экспертизы диссертации (заключение утверждено ректором учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» 15.05.2024) и соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 (п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика»).

Результаты исследований, представленные в диссертации, использованы при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

1) «Разработка конструкции и технологии изготовления биосенсоров на базе транзисторов с высокой подвижностью электронов для использования в качестве элементной базы исследования *in vitro* предикторов токсических свойств наночастиц» ГПНИ «Информатика, космос и безопасность» на 2016–2018 гг. (№ госрегистрации 20163743);

2) «Разработка интегрированной системы приема и обработки данных высокочувствительного датчика токсичных наноразмерных частиц на базе транзистора с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) с конструктивными элементами на основе функциональных квазидвумерных материалов» ГПНИ «Информатика, космос и безопасность» на 2019–2020 гг. (№ госрегистрации 20192725);

3) «Разработка методов моделирования технологических операций изготовления и электрических характеристик приборных структур на основе нитрида галлия» ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2019–2020 гг. (№ госрегистрации 20192388);

4) «Разработка методов проектирования и оптимизации конструктивно-технологических параметров элементной базы радиофотоники, силовой и СВЧ электроники на основе нитрида галлия» ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» на 2021–2025 гг. (№ госрегистрации 20212687);

5) «Разработка конструкции нитрид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов с эффективной системой теплоотвода на основе графена», договор с БРФФИ № Т18М-108 на 2018–2020 гг. (№ госрегистрации 20181517);

б) «Приборное моделирование электрических, частотно-мощностных, термических и механических характеристик транзистора с высокой подвижностью электронов на основе GaN и GaAs», договор с ООО «Бел Хуавэй Технолоджис» № FPA3071BLR1904030041363890413740 от 01.04.2019.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационной работы является разработка принципов построения конструкции и установление посредством компьютерного моделирования особенностей физических процессов и явлений, протекающих в транзисторах с высокой подвижностью электронов, сформированных на основе нитридов элементов третьей группы, с конструктивными элементами, предназначенными для отведения избыточного тепла.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

– определить ключевые конструктивно-технологические решения, обеспечивающие уменьшение влияния эффекта саморазогрева в транзисторах с высокой подвижностью электронов, сформированных на основе нитридов элементов третьей группы;

– разработать и встроить в программный комплекс приборного моделирования физико-математические модели, предназначенные для описания (в том числе с учетом температурной зависимости) параметров материалов, используемых в уравнении Пуассона, уравнениях непрерывности и уравнении теплового потока;

– разработать структуры и исследовать по результатам компьютерного моделирования эксплуатационные характеристики транзисторов с высокой подвижностью электронов, сформированных на основе нитридов элементов третьей группы, с конструктивными элементами, предназначенными для отведения избыточного тепла;

– выполнить оптимизацию геометрических параметров транзистора с высокой подвижностью электронов, сформированного на основе нитридов элементов третьей группы, с конструктивными элементами, предназначенными для отведения избыточного тепла.

Объектом исследования является транзистор с высокой подвижностью электронов, сформированный на основе нитридов элементов третьей группы.

Предметом исследования являются входные и выходные электрические характеристики в непрерывном и импульсном режимах работы, а также частотные характеристики в режиме малого сигнала транзисторов с высокой подвижностью электронов, сформированных на основе нитридов элементов третьей группы, с конструктивными элементами, предназначенными для отведения избыточного тепла.

Научная новизна

1. Установлено, что при учете температурной зависимости теплопроводности материалов, используемых для формирования транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитридов элементов третьей группы (AlN, GaN, AlGaN) на сапфировой подложке, выходная мощность при максимальной температуре 550 К в структуре прибора уменьшается на 18,26 % с 5,86 до 4,79 Вт.

2. Установлено, что теплоотводящий элемент на основе графена, расположенный между теплопоглощающим элементом и затвором, не контактируя с последним, на верхней поверхности транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитридов элементов третьей группы, оказывает влияние на распределение рассеиваемой мощности и электрическое поле в структуре прибора, что приводит к снижению максимальной температуры на 19,6 К с 481,8 до 462,2 К и повышению максимальной напряженности электрического поля у границы затвора со стороны стока в 2,5 раза с 1,09 до 2,73 МВ/см.

3. Установлено, что формирование дополнительного пути для отведения избыточного тепла из активной области транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитридов элементов третьей группы с помощью конструктивного элемента на основе кубического нитрида бора, частично замещающего слой пассивации на основе SiO₂ между стоком и теплопоглощающим элементом, приводит к уменьшению максимальной температуры в структуре прибора на 51,1 К с 481,8 до 430,7 К.

4. Определены геометрические параметры, оказывающие наибольшее влияние на величину выходной мощности нормально закрытого транзистора с высокой подвижностью электронов на основе двойной гетероструктуры AlGaIn/AlN/GaN с теплоотводящим элементом на основе графена, расположенным на верхней поверхности приборной структуры между теплопоглощающим элементом и затвором, не контактируя с последним, и теплоотводящим элементом на основе кубического нитрида бора, частично замещающим слой пассивации на основе SiO₂ между стоком и теплопоглощающим элементом: толщина слоя *p*-AlGaIn под затвором, расстояние между истоком и верхней частью затвора и толщина промежуточного слоя AlN, изменение значений которых в пределах ±10 % приводит к изменению выходной мощности в пределах от 2,88 до 3,63 Вт.

Положения, выносимые на защиту

1. Физико-математические модели, встроенные в программный комплекс компании Silvaco, описывающие температурную зависимость теплопроводности материалов, используемых для формирования транзистора

с высокой подвижностью электронов на основе двойной гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN на сапфировой подложке, и учитывающие уменьшение выходной мощности на 18,26 % с 5,86 до 4,79 Вт при максимальной температуре 550 К в структуре прибора вследствие снижения теплопроводности с повышением температуры.

2. Структура сформированного на сапфировой подложке транзистора с высокой подвижностью электронов на основе AlGaN/AlN/GaN с теплоотводящим элементом на основе графена, расположенным на верхней поверхности этой структуры между теплопоглощающим элементом и затвором, не контактируя с последним, и обеспечивающим дополнительный путь для отведения избыточного тепла и повышение напряженности электрического поля у границы затвора со стороны стока, обладающая граничной частотой 16,28 ГГц и максимальной частотой генерации 79,76 ГГц, которые в 1,95 и 4,64 раз больше соответствующих величин 8,37 ГГц и 17,19 ГГц для базовой структуры.

3. Структура транзистора с высокой подвижностью электронов на основе AlGaN/AlN/GaN, сформированного на сапфировой подложке, с теплоотводящим элементом на основе кубического нитрида бора, частично замещающим слой пассивации на основе SiO₂ между стоком и теплопоглощающим элементом и обеспечивающим эффективное отведение избыточного тепла из активной области, отличающаяся величиной тока стока 0,163 А при напряжении затвор-исток 6 В и напряжении сток-исток 30 В, которая на 32,52 % больше соответствующей величины 0,123 А для базовой структуры.

4. Методика оптимизации геометрических параметров, заключающаяся в последовательном выполнении отсеивающего эксперимента по плану Плакетта – Бермана для определения наиболее значимых параметров и полного факторного эксперимента для нахождения оптимальных значений этих параметров, позволяющая увеличить выходную мощность нормально закрытого транзистора с высокой подвижностью электронов на основе материалов AlGaN/AlN/GaN с теплоотводящим элементом на основе графена, расположенным на верхней поверхности приборной структуры между теплопоглощающим элементом и затвором, не контактируя с последним, и теплоотводящим элементом на основе кубического нитрида бора, частично замещающим слой пассивации на основе SiO₂ между стоком и теплопоглощающим элементом, на 11,35 % с 3,26 до 3,63 Вт.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты диссертационной работы получены лично соискателем. Совместно с научным руководителем кандидатом технических наук, доцентом Стемпицким В.Р. определены структура, цели и задачи исследования, обобщены основные научные результаты. Соавторы опубликованных работ Ловшенко И.Ю., Баранова М.С., Гвоздовский Д.Ч., Шандарович (в девичестве Ханько) В.Т., Дао Динь Ха, Чан Туан Чунг и Джамаль Саад А. Омер принимали участие в обсуждении и интерпретации полученных результатов.

На совместно опубликованные работы с авторами приведены ссылки. Результаты, полученные без вклада соискателя, в диссертационную работу не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих международных и республиканских конференциях: 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» – КрыМиКо'2016 (Севастополь, 2016 г.); 2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications – АТС-2016 (Ханой, Вьетнам, 2016 г.); 11-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» (Москва, Россия, 2017 г.); 4-я Школа-конференция с международным участием по оптоэлектронике, фотонике и наноструктурам «Saint Petersburg OPEN 2017» (Санкт-Петербург, Россия, 2017 г.); XX Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, Россия, 2017 г.); 2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications – АТС-2019 (Ханой, Вьетнам, 2019 г.); XIX Международный симпозиум «Нанопроектирование, технология, компьютерное моделирование» – NDTCS-2021 (Минск, Беларусь, 2021 г.); 2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications – АТС-2022 (Ханой, Вьетнам, 2022 г.).

Результаты диссертационных исследований внедрены в учебный процесс кафедры микро- и наноэлектроники и кафедры электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», а также кафедры «Интеллектуальные и мехатронные системы» Белорусского национального технического университета.

Результаты диссертационной работы переданы в ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» для использования в рамках

компьютерного проектирования и оптимизации конструктивных параметров и эксплуатационных характеристик приборных структур элементной базы силовой и СВЧ-электроники на основе нитридов элементов третьей группы, что подтверждается соответствующим Актом использования.

На основе результатов диссертационных исследований подана и опубликована заявка на изобретение «Нормально закрытый нитрид-галлиевый гетероструктурный полевой транзистор с системой теплоотвода на основе графена и нитрида бора».

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 20 научных работах общим объемом 10,48 авторского листа. Из них 7 статей объемом 6,39 авторского листа в рецензируемых научных журналах в соответствии с пунктом 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 7 публикаций в материалах и сборниках трудов научных конференций объемом 3,39 авторского листа, 5 тезисов докладов на научных конференциях объемом 0,64 авторского листа, 1 заявка на изобретение объемом 0,06 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, 4 глав с краткими выводами, заключения, списка использованных источников и приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 176 страниц, из них 93 страницы основного текста, 44 рисунка на 24 страницах, 26 таблиц на 8 страницах, библиографический список из 251 наименования на 19 страницах, список публикаций автора из 20 наименований на 3 страницах, 4 приложения на 29 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена анализу современного состояния и тенденций развития технологии ТВПЭ на основе нитридов элементов третьей группы (AlN, GaN, AlGaN), в ней обозначен ряд критических проблем, которые сдерживают совершенствование и коммерциализацию приборов этого класса. Рассмотрены фундаментальные физические процессы, протекающие в модуляционно-легированных структурах на основе твердотельных гетеропереходов и приводящие к формированию двумерного электронного газа, свойства которого во многом определяют эксплуатационные характеристики ТВПЭ. Выполнен сравнительный анализ физических свойств

системы материалов (Al,Ga,In)N и ряда других полупроводников, широко используемых в оптоэлектронике, силовой и СВЧ-электронике.

Исследованы методы уменьшения влияния эффекта саморазогрева на электрические и частотные характеристики ТВПЭ. Отмечено, что при фиксированной разнице между температурой в области проводящего канала и температурой корпуса рассеиваемая мощность ограничивается способностью прибора отводить тепло. Таким образом, актуальной является задача разработки системы теплоотвода транзистора, которая будет функционировать на микроскопическом уровне (уровне прибора) в дополнение к решениям, обеспечивающим снижение температурного сопротивления на уровне интегральной схемы или корпуса. Для формирования теплоотводящих элементов (ТОЭ) предложено использование малослойного графена и нитрида бора с кубической структурой (β -BN).

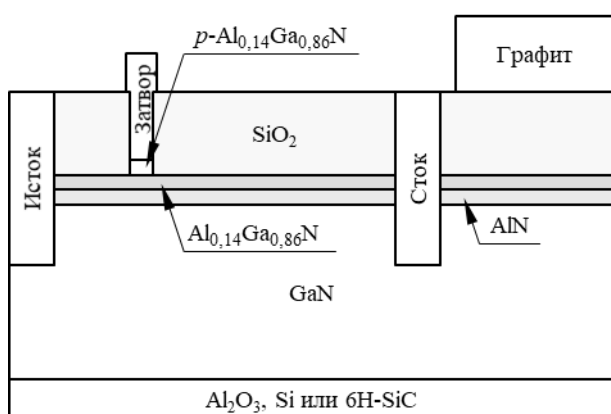


Рисунок 1 – Базовая конструкция ТВПЭ (приборная структура СТР-1)

Во **второй** главе приведено описание исследуемой конструкции сформированного на сапфировой (Al_2O_3), кремниевой (Si) и карбид-кремниевой (6H-SiC) подложках нормально закрытого AlGaN/AlN/GaN-ТВПЭ (рисунок 1) с полным перечнем геометрических и технологических параметров. Представлен порядок проведения приборного моделирования и оптимизации с помощью программного комплекса компании Silvaco.

Приведены используемые для моделирования эксплуатационных характеристик ТВПЭ уравнения и модели, включая уравнение Пуассона и уравнения непрерывности, диффузионно-дрейфовую модель переноса носителей заряда и термодинамически строгую модель саморазогрева. Отмечены температурно-зависимые параметры: ширина запрещенной зоны, эффективная плотность состояний в зоне проводимости и валентной зоне, подвижность электронов в условиях слабого и сильного электрических полей.

Установлено, что распределение температуры в структуре ТВПЭ, возникающее вследствие эффекта саморазогрева, обладает высокой чувствительностью к величине теплопроводности отдельных областей приборной структуры. Это требует включения в расчеты температурного распределения физико-математических моделей, позволяющих учитывать температурную зависимость теплопроводности материалов, применяемых для формирования ТВПЭ. Соответствующие модели были встроены

в программный комплекс компании Silvaco с помощью интерпретатора языка программирования Си. Так как в различных литературных источниках и базах данных значения теплопроводности в зависимости от температуры обычно приводятся в графическом или табличном виде, построение моделей осуществлялось путем представления температурной зависимости в математической форме подбором аппроксимирующей кривой. Стандартной функцией для описания температурной зависимости теплопроводности является степенная функция:

$$\kappa(T) = \kappa(300 \text{ K}) \left(\frac{T}{300} \right)^\gamma, \quad (1)$$

где κ – теплопроводность, Вт/(м·К); T – температура, К; γ – эмпирический коэффициент.

Значения параметров $\kappa(300 \text{ K})$ и γ для материалов, используемых при формировании исследуемой конструкции ТВПЭ и ее вариантов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры модели теплопроводности

Материал	Параметр		Диапазон применимости, К
	$\kappa(300 \text{ K})$, Вт/(см·К)	γ	
Al ₂ O ₃	0,387	-1,195	300–700
Si	1,48	-1,65	300–800
6H-SiC	3,736	-1,49	300–500
AlN	3,893	-1,277	300–700
GaN	2,583	-1,031	300–700
SiO ₂	0,0138	0,33	300–600
β -BN	8,368	-0,972	300–500
Пиролитический графит	19,342	-1,125	300–700

При расчете теплопроводности золота, на основе которого в упрощенном виде реализованы омические контакты ТВПЭ, применялась линейная зависимость от температуры (в пределах от 300 до 700 К):

$$\kappa(\text{Au})(T) = 3,365 - 6,5 \cdot 10^{-4} T. \quad (2)$$

Теплопроводность малослойного графена принималась равной 20 Вт/(см·К). Это значение соответствует пленке, состоящей из десяти и более атомных слоев углерода.

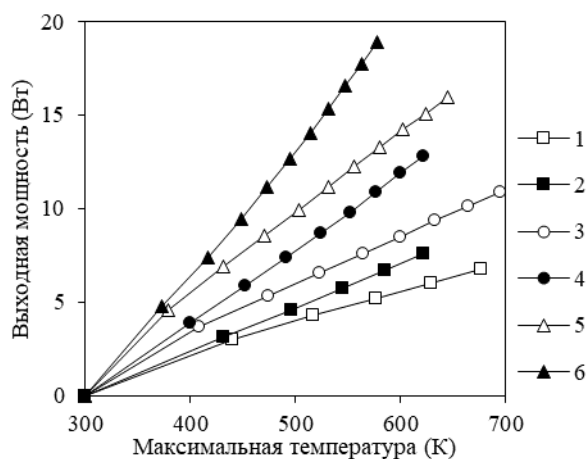


Рисунок 2 – Зависимости выходной мощности от максимальной температуры в структуре прибора при различных моделях теплопроводности

На рисунке 2 показаны зависимости выходной мощности базовой конструкции ТВПЭ от максимальной температуры в структуре прибора на сапфировой (1, 2), кремниевой (3, 4) и карбид-кремниевой (5, 6) подложках, рассчитанные с помощью моделей теплопроводности, как учитывающих (1, 3, 5), так и игнорирующих (2, 4, 6) температурную зависимость. Установлено, что при максимальной температуре 550 К в структуре прибора на сапфировой подложке расхождение значений выходной мощности, наблюдаемое в результате использования моделей теплопроводности двух принципиально

отличающихся классов, составляет 18,26 %. Вследствие снижения теплопроводности с повышением температуры выходная мощность уменьшается с 5,86 до 4,79 Вт.

Описан метод оптимизации геометрических параметров ТВПЭ, заключающийся в последовательном проведении отсеивающего эксперимента по плану Плакетта – Бермана, предназначенного для нахождения наиболее значимых параметров, и полного двухуровневого факторного эксперимента, необходимого для определения оптимальных значений этих наиболее значимых параметров.

В третьей главе представлены результаты моделирования двух вариантов $Al_{0,14}Ga_{0,86}N/AlN/GaN$ -ТВПЭ с системой теплоотвода, состоящей из отдельных конструктивных элементов, предназначенных для отведения из активной области прибора (для этого используется ТОЭ на основе графена) и последующего поглощения с помощью графитового теплопоглощающего элемента (ТПЭ) избыточного тепла (рисунки 3 и 4).

Установлено, что эффективное отведение тепла из активной области транзистора с помощью графена приводит к снижению температуры на всем протяжении канала. Вследствие этого ток стока приборной структуры СТР-2 при напряжении затвор-исток 6 В и напряжении сток-исток 30 В увеличивается на 11,38 % (с 0,123 до 0,137 А), а максимальная температура в структуре прибора уменьшается на 19,6 К (с 481,8 до 462,2 К). При тех же условиях ток стока приборной структуры СТР-3 повышается на 13,01 %, а максимальная температура снижается на 23,1 К.

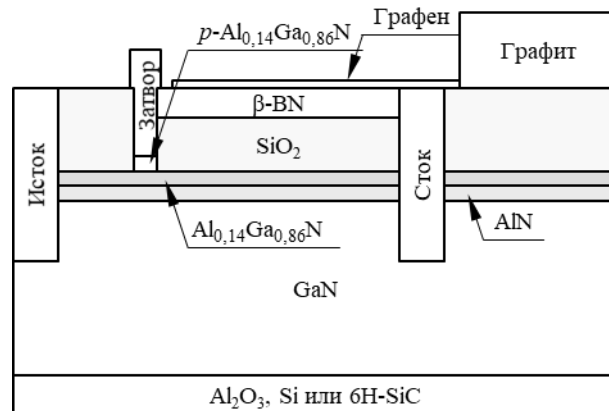
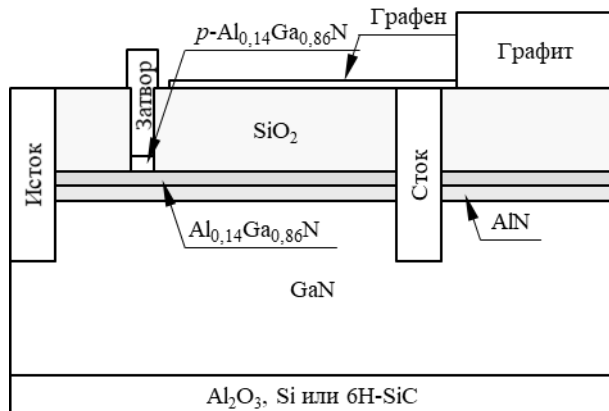


Рисунок 3 – Приборная структура СТР-2 Рисунок 4 – Приборная структура СТР-3

Выявлено, что внедрение в конструкцию ТВПЭ ТОЭ на основе графена позволяет значительно ослабить влияние эффекта саморазогрева на его частотные характеристики в режиме малого сигнала. На рисунках 5 и 6 представлены частотные характеристики приборных структур СТР-1 (1, 3) и СТР-2 (2, 4) на сапфировой (1, 2) и карбид-кремниевой (3, 4) подложках, которые включают зависимости от частоты соответственно коэффициента усиления по току и коэффициента однонаправленного усиления по мощности.

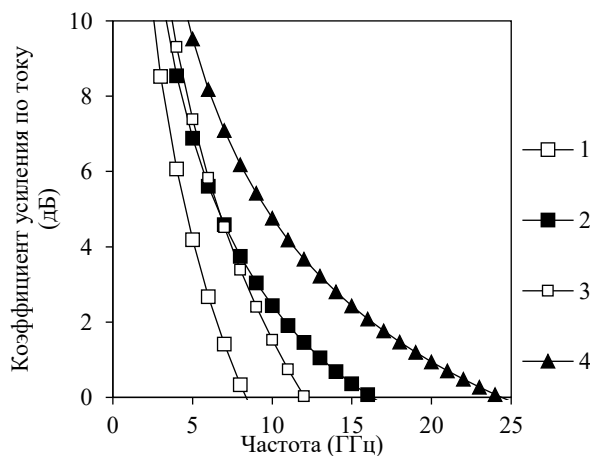


Рисунок 5 – Зависимости коэффициента усиления по току от частоты

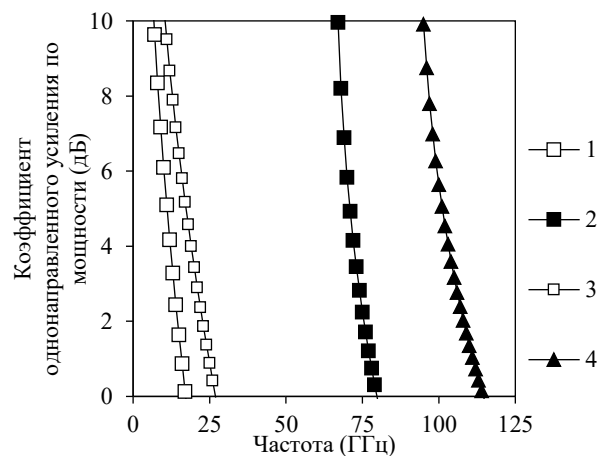


Рисунок 6 – Зависимости коэффициента однонаправленного усиления по мощности от частоты

При напряжении затвор-исток 6 В и напряжении сток-исток 30 В граничная частота и максимальная частота генерации приборной структуры СТР-2 на сапфировой подложке увеличиваются в 1,95 раз (с 8,37 до 16,28 ГГц) и 4,46 раз (с 17,19 до 79,76 ГГц) соответственно.

Установлено, что удлинение слоев графена в направлении затвора оказывает пренебрежимо малое влияние на выходные характеристики по постоянному току, однако приводит к улучшению частотных

характеристик в режиме малого сигнала. На рисунке 7 представлены зависимости граничной частоты и максимальной частоты генерации приборной структуры СТР-2 на сапфировой подложке от расстояния между затвором и ТОЭ на основе графена. Сокращение расстояния между затвором и ТОЭ на основе графена с 6,0 до 0,2 мкм приводит к повышению граничной частоты и максимальной частоты генерации в 1,85 и 4,14 раз соответственно. Эту зависимость можно объяснить уменьшением эффективной длины затвора по мере приближения проводящих слоев графена к затвору.

Результаты серии расчетов в рамках модели ударной ионизации Чиновета показали, что осаждение ТОЭ на основе графена на верхнюю поверхность ТВПЭ оказывает двоякое влияние на напряжение пробоя. На рисунке 8 приведена зависимость этой величины от расстояния между затвором и ТОЭ на основе графена. Если расположение этого элемента ограничивается пределами стока, напряжение пробоя приборной структуры СТР-2 на сапфировой подложке повышается с 777 до 986 В. Удлинение же слоев графена за сток в сторону затвора вызывает снижение напряжения пробоя, так как по мере приближения проводящих слоев графена к затвору возрастает напряженность электрического поля у границы затвора со стороны стока. Это приводит к увеличению коэффициентов ударной ионизации и, следовательно, лавинообразной генерации электронно-дырочных пар.

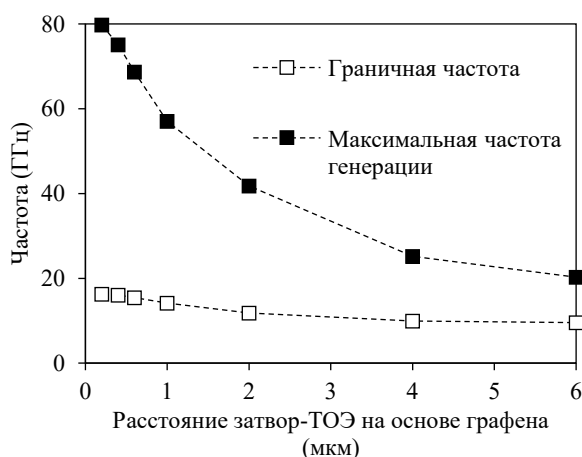


Рисунок 7 – Зависимости граничной частоты и максимальной частоты генерации от расстояния затвор–ТОЭ на основе графена

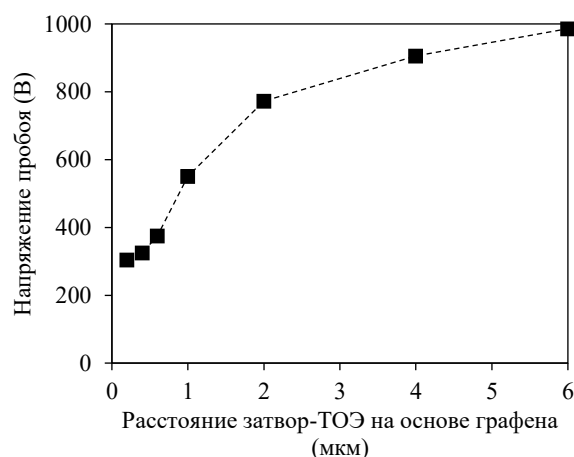


Рисунок 8 – Зависимость напряжения пробоя от расстояния затвор–ТОЭ на основе графена

В четвертой главе представлены результаты моделирования двух вариантов $Al_{0,14}Ga_{0,86}N/AlN/GaN$ -ТВПЭ, которые отличаются от базовой конструкции тем, что между стоком и ТПЭ располагается ТОЭ на основе

β -BN, частично замещающий слой пассивации, и при этом одна из приборных структур содержит сразу два типа ТОЭ (рисунки 9 и 10).

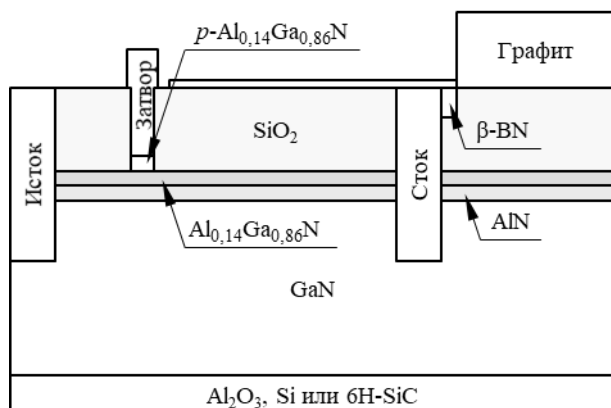


Рисунок 9 – Приборная структура СТР-4

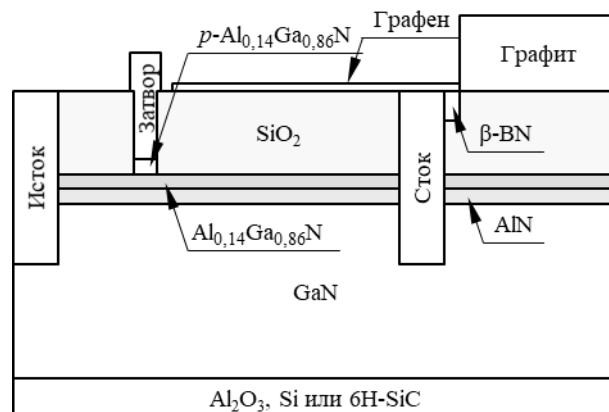


Рисунок 10 – Приборная структура СТР-5

Установлено, что внедрение в конструкцию ТВПЭ ТОЭ на основе β -BN позволяет значительно ослабить влияние эффекта саморазогрева, улучшить электрические и частотные характеристики в режиме малого сигнала, а также увеличить напряжение пробоя.

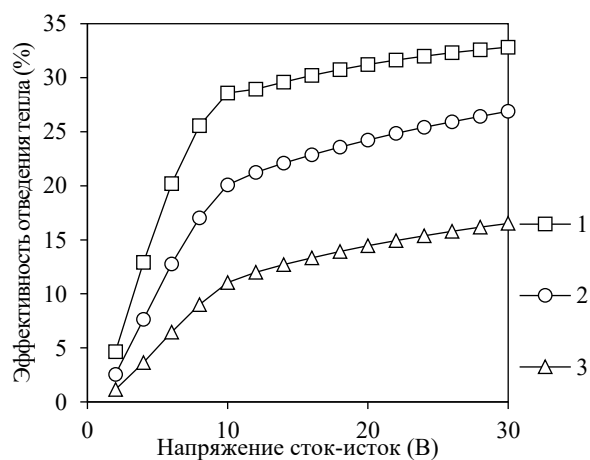


Рисунок 11 – Зависимости эффективности работы ТОЭ на основе β -BN от напряжения сток-исток

На рисунке 11 представлены зависимости эффективности отведения тепла от напряжения сток-исток для приборной структуры СТР-4 на сапфировой (1), кремниевой (2) и карбид-кремниевой (3) подложках. В результате эффективного отведения избыточного тепла ток стока транзистора на сапфировой подложке повышается на 32,52 % (с 0,123 до 0,163 А), а максимальная температура в структуре прибора снижается на 51,1 К (с 481,8 до 430,7 К). При этом граничная частота и максимальная частота

генерации увеличиваются в 1,39 раз (с 8,37 до 11,64 ГГц) и 1,49 раз (с 17,19 до 25,57 ГГц) соответственно. Напряжение пробоя повышается с 777 до 1093 В.

На рисунке 12 показаны зависимости максимальной температуры от плотности выходной мощности для приборных структур СТР-1 и СТР-2 на сапфировой подложке, которые сопоставляются с результатами зарубежной экспериментальной работы, где ТОЭ представлял собой осажденную на всю верхнюю поверхность приборной структуры пленку гексагонального нитрида

бора. Графики 1 и 2 соответствуют данным, полученным для исходной структуры и после формирования ТОЭ. Одной из причин несовпадения результатов является относительно низкая по сравнению с графеном теплопроводность гексагонального нитрида бора – 4 Вт/(см·К). Адекватность используемых моделей подтверждается экспериментальными результатами (3), предоставленными ООО «Бел Хуавэй Технолоджис» для AlGaIn/GaN-ТВПЭ на кремниевой подложке.

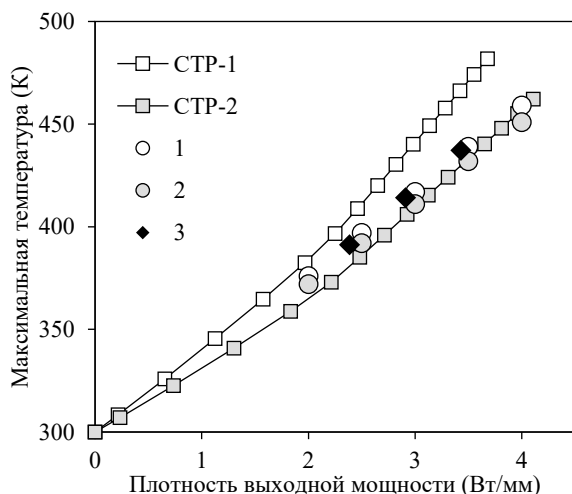


Рисунок 12 – Зависимости максимальной температуры от плотности выходной мощности

В рамках отсеивающего эксперимента по плану Плакетта – Бермана для приборной структуры СТР-5 на сапфировой подложке выявлено, что наибольшее влияние на выходную мощность оказывают толщина слоя *p*-AlGaIn под затвором, расстояние от истока до верхней части затвора и толщина промежуточного слоя AlN. Полный двухуровневый факторный эксперимент показал, что выходная мощность при напряжении сток-исток 15 В может быть увеличена на 11,35 % (с 3,26 до 3,63 Вт).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. С использованием компьютерного моделирования, которое является эффективным инструментом для решения задач, связанных с разработкой и совершенствованием полупроводниковых приборов, установлено, что с учетом высокой теплопроводности и достаточной производственной технологичности подходящими материалами для формирования конструктивного элемента, предназначенного для отведения избыточного тепла из активной области ТВПЭ на основе нитридов элементов третьей группы, являются CVD-алмаз, малослойный графен и β -BN [1–А; 2–А; 3–А; 4–А; 6–А; 7–А; 8–А; 9–А; 10–А; 11–А; 12–А; 14–А; 17–А; 19–А; 20–А].

2. Для учета различных механизмов генерации тепла в ТВПЭ на основе нитридов элементов третьей группы обязательным является нахождение самосогласованного решения системы уравнений, состоящей из уравнения Пуассона, уравнений непрерывности и описывающего эволюцию локальной температуры уравнения теплового потока. Так как получаемое вследствие эффекта саморазогрева распределение температуры в структуре транзистора

характеризуется чрезвычайно высокой чувствительностью к значениям теплопроводности в отдельных областях этой структуры, с целью получения адекватных результатов компьютерного моделирования в программный комплекс компании Silvaco с помощью интерпретатора языка программирования Си встроены физико-математические модели, предназначенные для описания температурной зависимости теплопроводности используемых для формирования транзистора материалов. Показано, что применение этих моделей обеспечивает учет уменьшения выходной мощности AlGaN/AlN/GaN-ТВПЭ на сапфировой подложке на 18,26 % с 5,86 до 4,79 Вт при максимальной температуре 550 К в активной области, которое наблюдается вследствие снижения теплопроводности с повышением температуры [5–А; 6–А; 7–А; 15–А; 16–А; 18–А].

3. В рамках исследования влияния технологических параметров на электрические характеристики нормально закрытого ТВПЭ на основе нитридов элементов третьей группы обнаружено, что внедрение акцепторных ловушек в буферный слой приводит к уменьшению тока стока в подпороговой области. Ток стока при нулевом напряжении затвор-исток достигает $1,04 \cdot 10^{-2}$ А в отсутствие легирующей примеси в буферном слое и снижается до $5,07 \cdot 10^{-10}$ А после внедрения акцепторных ловушек. Установлено, что путем варьирования концентрации акцепторной примеси в слое *p*-GaN или *p*-AlGaN, расположенном между затвором и барьерным слоем, может осуществляться регулировка порогового напряжения. При повышении концентрации с $4,0 \cdot 10^{18}$ до $5,3 \cdot 10^{18}$ см⁻³ пороговое напряжение увеличивается с 1,48 до 1,98 В [6–А; 13–А; 14–А].

4. Из результатов приборного моделирования следует, что внедрение в конструкцию ТВПЭ на основе нитридов элементов третьей группы системы теплоотвода, включающей ТОЭ на основе графена, позволяет ослабить влияние эффекта саморазогрева на электрические и частотные характеристики прибора. Установлено, что эффективное отведение из активной области транзистора избыточного тепла с помощью слоев графена приводит к уменьшению температуры на всем протяжении проводящего канала. Как следствие, ток стока при напряжении затвор-исток 6 В и напряжении сток-исток 30 В повышается на 11,38 % с 0,123 до 0,137 А, а максимальная температура в структуре прибора уменьшается на 19,6 К с 481,8 до 462,2 К. При этом граничная частота и максимальная частота генерации, полученные в режиме малого сигнала, увеличиваются в 1,95 раз с 8,37 до 16,28 ГГц и 4,46 раз с 17,19 до 79,76 ГГц соответственно [2–А; 3–А; 4–А; 14–А].

5. Из результатов приборного моделирования следует, что внедрение в конструкцию ТВПЭ на основе нитридов элементов третьей группы системы теплоотвода, состоящей из ТОЭ на основе β -BN и ТПЭ на основе графита,

позволяет ослабить воздействие эффекта саморазогрева, улучшить электрические и частотные характеристики в режиме малого сигнала, а также повысить напряжение пробоя прибора. Установлено, что в результате эффективного отведения избыточного тепла из активной области транзистора с помощью слоя β -BN ток стока при напряжении затвор-исток 6 В и напряжении сток-исток 30 В увеличивается на 32,52 % с 0,123 до 0,163 А, а максимальная температура в структуре прибора снижается на 51,1 К с 481,8 до 430,7 К. При этом граничная частота и максимальная частота генерации повышаются в 1,39 раз с 8,37 до 11,64 ГГц и 1,49 раз с 17,19 до 25,57 ГГц соответственно. Напряжение пробоя увеличивается с 777 до 1093 В [6–А].

6. По итогам отсеивающего эксперимента, проведенного по плану Плакетта – Бермана, выявлено, что среди геометрических параметров наибольшее влияние на величину выходной мощности нормально закрытого AlGaIn/AlN/GaN-ТВПЭ, в конструкцию которого внедрены ТОЭ на основе графена и β -BN, оказывают толщина слоя p -AlGaIn под затвором, расстояние от истока до верхней части затвора и толщина промежуточного слоя AlN. В результате проведения полного двухуровневого факторного эксперимента для приборной структуры на сапфировой подложке установлено, что выходная мощность при напряжении сток-исток 15 В может быть увеличена на 11,35 % с 3,26 до 3,63 Вт [7–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Предложенная в рамках диссертационных исследований система теплоотвода, состоящая из ТПЭ на основе графита и конструктивных элементов на основе малослойного графена и β -BN, предназначенных для отведения избыточного тепла, может быть использована для уменьшения влияния эффекта саморазогрева в различных силовых приборах [7–А; 20–А].

2. Основные результаты диссертационной работы, в частности, разработанные физико-математические модели для описания параметров материалов с учетом температурной зависимости, а также метод оптимизации геометрических и технологических параметров приборной структуры, могут быть использованы для повышения уровня подготовки студентов высших учебных заведений по дисциплинам «Гетероструктуры из полупроводниковых соединений и приборы на их основе», «Моделирование приборов микро- и наноэлектроники» за счет изучения современных подходов к исследованию принципов функционирования силовых и СВЧ-приборов, а также соответствующих программных средств проектирования при выполнении курсовых работ, дипломных проектов и при проведении научных и прикладных исследований [7–А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ НАУЧНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Конструктивно-технологические особенности сенсорных устройств на основе широкозонных полупроводников / В. С. Волчѣк [и др.] // Докл. БГУИР. – 2015. – Т. 7, № 93. – С. 99–105.

2–А. Нитрид-галлиевый транзистор с высокой подвижностью электронов с эффективной системой теплоотвода на основе графена / В. С. Волчѣк [и др.] // Докл. БГУИР. – 2020. – Т. 18, № 3. – С. 72–80.

3–А. Волчѣк, В. С. Нитрид-галлиевый гетероструктурный полевой транзистор с системой теплоотвода на основе канавки в слое пассивации, заполненной материалом с высокой теплопроводностью / В. С. Волчѣк, В. Р. Стемпицкий // Докл. БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 6. – С. 74–82.

4–А. Volcheck, V. S. Large Signal Performance of the Gallium Nitride Heterostructure Field-Effect Transistor with a Graphene Heat-Removal System / V. S. Volcheck, V. R. Stempitsky // Doklady BGUIR. – 2022. – Vol. 20, No 1. – P. 40–47.

5–А. Volcheck, V. Thermal Conductivity of Wurtzite Gallium Nitride / V. Volcheck, M. Baranova, V. Stempitsky // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus : Physical-Technical Series. – 2022. – Vol. 67, No 3. – P. 285–297.

6–А. Volcheck, V. Device Characterization of the Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor with a Boron Nitride Heat-Spreading Element / V. Volcheck, V. Stempitsky // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus : Physical-Technical Series. – 2023. – Vol. 68, No 2. – P. 156–166.

7–А. Volcheck, V. Design Optimization of the Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor with Graphene and Boron Nitride Heat-Spreading Elements / V. Volcheck, I. Lovshenko, V. Stempitsky // Semiconductors. – 2023. – Vol. 57, No 3. – P. 216–223.

Статьи в сборниках материалов конференций

8–А. Волчѣк, В. С. Оптимизация конструкции транзистора с высокой подвижностью электронов, обеспечивающей снижение влияния эффекта саморазогрева / В. С. Волчѣк, В. Р. Стемпицкий // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы 26-й Междунар. Крымской конф., Севастополь, 4–10 сент. 2016 г. / Севастопол. гос. ун-т. – Севастополь, 2016. – С. 1600–1606.

9–А. Suppression of the Self-Heating Effect in AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistor by Diamond Heat Sink Layers / V. Volchek [et al.] // *Advanced Technologies for Communications (ATC) : proc. of the 2016 Intern. Conf., Hanoi, Vietnam, 12–14 Oct. 2016.* – Hanoi, 2016. – P. 264–267.

10–А. Volcheck, V. S. Suppression of the Self-Heating Effect in GaN HEMT by Few-Layer Graphene Heat Spreading Elements / V. S. Volcheck, V. R. Stempitsky // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2017. – Vol. 917. – Art. No 082015.

11–А. Волчѣк, В. С. Электрические и частотные свойства транзистора с высокой подвижностью электронов с графеновыми теплоотводящими элементами / В. С. Волчѣк, В. Р. Стемпицкий // *Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. ст. / Сиб. федер. ун-т ; науч. ред.: А. И. Громько.* – Красноярск, 2017. – С. 500–503.

12–А. Технологические и конструктивные решения высокочастотных, мощных и оптоэлектронных приборов на основе нитрида галлия / И. Ю. Ловшенко [и др.] // *Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : материалы Междунар. науч.-техн. семинара, Минск, апр.–дек. 2017 г.* – Минск, 2017. – С. 69–74.

13–А. Iron-Induced Acceptor Centers in the Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor: Thermal Simulation and Analysis / D. H. Dao [et al.] // *Advanced Technologies for Communications (ATC) : Proc. of the 2019 Intern. Conf., Hanoi, Vietnam, 17–19 Oct. 2019.* – Hanoi, 2019. – P. 308–312.

14–А. DC, AC and Breakdown Simulation of the Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor with a Few-Layer Graphene Heat-Removal System / D. H. Dao [et al.] // *Advanced Technologies for Communications (ATC) : Proc. of the 2022 Intern. Conf., Hanoi, Vietnam, 20–22 Oct. 2022.* – Hanoi, 2022. – P. 121–125.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

15–А. Волчѣк, В. С. Моделирование эффекта саморазогрева транзистора с высокой подвижностью электронов на различных подложках / В. С. Волчѣк // *Интеллектуальные и сенсорные системы – 2016 : сб. науч. тр. по материалам Респ. студ. науч.-техн. конф. [Электронный ресурс] / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: А. В. Гулай, А. М. Авсиевич.* – Минск, 2016. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/24557>. – Дата доступа: 31.08.2021.

16–А. Волчѣк, В. С. Моделирование эффекта саморазогрева транзистора с высокой подвижностью электронов на различных подложках / В. С. Волчѣк // *Технические средства защиты информации : XIV Белорус.-Рос. науч.-техн. конф., Минск, 25–26 мая 2016 г. : тез. докл. // Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники.* – Минск, 2016. – С. 51.

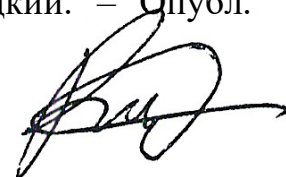
17–А. Волчѣк, В. С. Оптимизация конструкции AlGaN/GaN НЕМТ, обеспечивающая снижение влияния эффекта саморазогрева с использованием теплоотводящих элементов на основе графена / В. С. Волчѣк, В. Р. Стемпицкий // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы : 11-я Всерос. конф., Москва, 1–3 февр. 2017 г. : тез. докл. / Мос. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Физ.-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе Рос. акад. наук. – М., 2017. – С. 122–123.

18–А. Temperature Dependence of the thermal conductivity of Wurtzite Aluminum Nitride, Gallium Nitride and Aluminum-Gallium Nitride / V. Volcheck [et al.] // Нанопроектирование, технология, компьютерное моделирование – NDTCS–2021 : XIX Междунар. симпозиум, Минск, 28–29 окт. 2021 г. : тез. докл. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2021. – С. 33–35.

19–А. Volcheck, V. Design Optimization of the Gallium Nitride Heterostructure Field-Effect Transistor with a Graphene Heat-Removal System / V. Volcheck, I. Lovshenko, V. Stempitsky // Нанопроектирование, технология, компьютерное моделирование – NDTCS–2021 : XIX Междунар. симпозиум, Минск, 28–29 окт. 2021 г. : тез. докл. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2021. – С. 63–64.

Заявка на патент

20–А. Нормально закрытый нитрид-галлиевый гетероструктурный полевой транзистор с системой теплоотвода на основе графена и нитрида бора : заявка ВУ 20220173 / В. С. Волчѣк, В. Р. Стемпицкий. – Опубл. 28.02.2024.



РЭЗІЮМЭ

Валчок Уладзіслаў Сяргеевіч

Структуры і прыборнае мадэляванне транзістараў з высокай рухомасцю электронаў на аснове нітрыду галію з палепшанымі цеплавымі характарыстыкамі

Ключавыя словы: мадэляванне, транзістар з высокай рухомасцю электронаў, эфект самаразагрэвання, цеплаправоднасць, цеплаадводны элемент, нітрыд галію, графен, нітрыд бору.

Мэта працы: распрацоўка прынцыпаў пабудовы канструкцыі і ўстанаўленне ў рамках камп'ютарнага мадэлявання асаблівасцей фізічных працэсаў і з'яў, якія працякаюць у транзістарах з высокай рухомасцю электронаў, сфарміраваных на аснове нітрыдаў элементаў трэцяй групы, з канструктыўнымі элементамі, прызначанымі для адвядзення збыткоўнага цепла.

Метад даследавання: камп'ютарнае мадэляванне ў рамках класічнай дыфузійна-дрэйфавай тэорыі і тэрмадынамічна строгай мадэлі самаразагрэву.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: з дапамогай інтэрпрэтатара мовы Сі ў праграмны комплекс кампаніі Silvaco ўбудаваны мадэлі для ўліку тэмпературнай залежнасці цеплаправоднасці матэрыялаў, якія выкарыстоўваюцца ў транзістарах з высокай рухомасцю электронаў на аснове нітрыдаў элементаў трэцяй групы. Устаноўлена, што сістэма цеплаадводу з двух цеплаадводных элементаў на аснове графену і кубічнага нітрыду бору, а таксама цеплапаглынальнага элемента на аснове графіту забяспечвае памяншэнне ўплыву эфекту самаразагрэву і паляпшэнне электрычных і частотных характарыстык нармальна закрытага транзістара з высокай рухомасцю электронаў на аснове AlGaN/AlN/GaN. У выніку скрынінгавага і поўнага факторнага эксперыментаў выяўлена, што большы ўплыў на велічыню выходнай магутнасці гэтага прыбора аказваюць таўшчыня пласта p -AlGaN пад засаўкай, адлегласць ад вытоку да верхняй часткі засаўкі і таўшчыня прамежкавага пласта AlN, аптымізацыя значэнняў якіх прыводзіць да падвышэння выходнай магутнасці на 11,35 %.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення: прапанаваныя канструктыўныя рашэнні, якія забяспечваюць паляпшэнне цеплавых характарыстык транзістараў з высокай рухомасцю электронаў, сфармаваных на аснове нітрыдаў элементаў трэцяй групы, могуць быць выкарыстаны ў розных прыборных структурах сілавой электронікі.

РЕЗЮМЕ

Волчѣк Владислав Сергеевич

Структуры и приборное моделирование транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия с улучшенными тепловыми характеристиками

Ключевые слова: моделирование, транзистор с высокой подвижностью электронов, эффект саморазогрева, теплопроводность, теплоотводящий элемент, нитрид галлия, графен, нитрид бора.

Цель работы: разработка принципов построения конструкции и установление в рамках компьютерного моделирования особенностей физических процессов и явлений, протекающих в транзисторах с высокой подвижностью электронов, сформированных на основе нитридов элементов третьей группы, с конструктивными элементами, предназначенными для отведения избыточного тепла.

Метод исследования: компьютерное моделирование в рамках классической диффузионно-дрейфовой теории и термодинамически строгой модели саморазогрева.

Полученные результаты и их новизна: с помощью интерпретатора языка Си в программный комплекс компании Silvaco встроены модели для учета температурной зависимости теплопроводности материалов, используемых в транзисторах с высокой подвижностью электронов на основе нитридов элементов третьей группы. Установлено, что система теплоотвода из двух теплоотводящих элементов на основе графена и кубического нитрида бора, а также теплопоглощающего элемента на основе графита обеспечивает уменьшение влияния эффекта саморазогрева и улучшение электрических и частотных характеристик нормально закрытого транзистора с высокой подвижностью электронов на основе AlGa_N/AlN/GaN. В рамках отсеивающего и полного факторного экспериментов выявлено, что наибольшее влияние на величину выходной мощности этого прибора оказывают толщина слоя *p*-AlGa_N под затвором, расстояние от истока до верхней части затвора и толщина промежуточного слоя AlN, оптимизация значений которых приводит к повышению выходной мощности на 11,35 %.

Рекомендации по использованию и область применения: предложенные конструктивные решения, обеспечивающие улучшение тепловых характеристик транзисторов с высокой подвижностью электронов, сформированных на основе нитридов элементов третьей группы, могут быть использованы в различных приборных структурах силовой электроники.

SUMMARY

Vladislav Volcheck

Structures and device simulation of high electron mobility transistors based on gallium nitride with enhanced thermal performance

Keywords: simulation, high electron mobility transistor, self-heating effect, thermal conductivity, heat-eliminating element, gallium nitride, graphene, boron nitride.

Objective of work: to develop device design principles and a self-consistent simulation methodology for studying the physical phenomena that occur in high electron mobility transistors based on the (Al,Ga)N material system and featuring structural elements designed to remove the excessive heat.

Research method: physically-based device simulation within the framework of the classical drift-diffusion theory and the thermodynamically rigorous lattice heating model.

Results and novelty of the research: advanced temperature and composition dependent thermal conductivity models for the materials used in high electron mobility transistors based on the (Al,Ga)N material system were incorporated into the Silvaco software package using the built-in C-interpreter. It was found out that a heat-removing system composed of a graphite heat sink and two heat-eliminating elements formed of graphene and cubic boron nitride can partly suppress the self-heating effect in normally-off AlGa_N/AlN/GaN high electron mobility transistor, leading to an improvement in its DC and AC performance. By running a screening study, it was determined that among the design parameters most influential on the output power of this device are the thickness of the *p*-AlGa_N layer underneath the gate, the distance from the source to the head of the gate, and the thickness of the AlN spacer layer. By conducting a full factorial experiment, it was established that the optimization of these critical design parameters results in an 11.35 % rise in the output power.

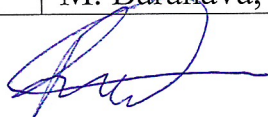
Usage guidelines and field of application: the design solutions proposed to enhance the thermal performance of high electron mobility transistors based on the (Al,Ga)N material system could be implemented for various device structures of power electronics.

ЛИСТ ИСПРАВЛЕНИЙ

в тексте автореферата диссертации Волчка Владислава Сергеевича
«Структуры и приборное моделирование транзисторов с высокой подвижностью
электронов на основе нитрида галлия с улучшенными тепловыми характеристиками»
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

№ страницы	Напечатано	Исправленный текст
17	1–А ... / В. С. Волчѣк [и др.] // ...	1–А ... / В. С. Волчѣк, Дао Динь Ха, И. Ю. Ловшенко, В. Р. Стемпицкий // ...
17	2–А ... / В. С. Волчѣк [и др.] // ...	2–А ... / В. С. Волчѣк, И. Ю. Ловшенко, В. Т. Шандарович, Дао Динь Ха // ...
18	9–А ... / V. Volchek [et al.] // ...	9–А ... / V. Volchek, D. H. Dao, V. Stempitsky, T. T. Tran // ...
18	12–А ... / И. Ю. Ловшенко [и др.] // ...	12–А ... / И. Ю. Ловшенко, В. С. Волчѣк, Дао Динь Ха, В. Т. Ханько, Джамаль Саад А. Омер, В. Р. Стемпицкий // ...
18	13–А ... / D. H. Dao [et al.] // ...	13–А ... / D. H. Dao, T. T. Tran, V. Volcheck, V. Stempitsky // ...
18	14–А ... / D. H. Dao [et al.] // ...	14–А ... / D. H. Dao, V. Volcheck, V. Stempitsky, T. T. Tran // ...
19	18–А ... / V. Volcheck [et al.] // ...	18–А ... / V. Volcheck, D. Hvazdouski, M. Baranova, V. Stempitsky // ...

Соискатель



В.С. Волчѣк

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
к.т.н., доцент



Г.А. Пискун

Научное издание

**Волчѣк
Владислав Сергеевич**

**СТРУКТУРЫ И ПРИБОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ
С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ
НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ
С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника,
приборы на квантовых эффектах**

Подписано в печать 21.11.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 188.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск