

ОТЗЫВ

официального оппонента

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

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите

Анализ содержания диссертации, а также использованных методов исследований позволяет заключить, что диссертация соответствует паспорту специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах и технической отрасли наук согласно пунктам:

3.1 создание (включая разработку конструкций и технологических маршрутов изготовления) и функционирование изделий твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов и систем микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах, нано- и микросенсоров;

3.2 физические и технические аспекты модификации изделий и приборов;

3.4 физические и математические модели изделий, устройств и технологических процессов, в том числе для систем автоматизированного проектирования.

2. Актуальность темы диссертации

В настоящее время силовые приборы на основе широкозонных полупроводников постепенно вытесняют кремниевые аналоги. Повышенный интерес к нитридам элементов III группы обусловлен высокой скоростью электронов при насыщении, высокой напряженностью электрического поля пробоя и отличной радиационной стойкостью. Перспективным полупроводниковым прибором силовой электроники является сформированный на основе GaN транзистор с высокой подвижностью электронов, который за счет высоких значений концентрации и подвижности носителей в канале, а также очень малой входной емкости обладает улучшенными электрическими и частотными характеристиками по сравнению с кремниевыми приборами. В связи с перспективностью применения данного рода изделий в энергосберегающих технологиях силовой электроники, электротранспорта и других систем

преобразования электрической энергии тема диссертации, несомненно, является актуальной.

3. Степень новизны результатов, научных положений, выносимых на защиту

Основные результаты и научные положения, представленные в диссертации, являются новыми и получены соискателем впервые. В качестве основных результатов необходимо выделить следующие:

1. Физико-математические модели, встроенные в программный комплекс Silvaco для описания температурной зависимости теплопроводности материалов, используемых для формирования на сапфировой подложке ТВПЭ на основе гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN, позволяют учесть уменьшение выходной мощности на 18,26% (с 5,86 Вт до 4,79 Вт) при максимальной температуре 550 К в структуре прибора, вызванное снижением теплопроводности с повышением температуры.

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

4. Предложенная 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, позволяет увеличить выходную мощность нормально закрытого транзистора с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры

AlGaN/AlN/GaN с теплоотводящими элементами на основе графена и с-BN на 11,35% (с 3,26 Вт до 3,63 Вт).

Новизна основных результатов отражена в 20 научных публикациях соискателя.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность основных результатов, научных положений и выводов диссертации не вызывает сомнений. Они определяются корректным применением физико-математических моделей для решения поставленных задач, количественным и качественным соответствием результатов расчетов имеющимся экспериментальным данным, апробированием на республиканских и международных научно-технических конференциях.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

Научная значимость результатов состоит в установлении закономерностей физических процессов, происходящих в транзисторах с высокой подвижностью электронов на основе GaN с теплоотводящими элементами на основе графена и с-BN, а также разработке соответствующих физико-математических моделей для компьютерного проектирования, которые имеют фундаментальный характер и могут быть использованы при разработке иных приборов силовой и СВЧ-электроники.

Практическая значимость результатов заключается:

1. В расширении функциональных возможностей программного комплекса Silvaco путем встраивания в него усовершенствованных физико-математических моделей, позволяющих учитывать температурную зависимость теплопроводности и теплоемкости материалов, используемых для формирования ТВПЭ на основе GaN.

2. В разработке структуры транзистора с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN с теплоотводящим элементом на основе графена, обеспечивающим дополнительный путь для отведения избыточного тепла и повышение напряженности электрического поля у границы затвора со стороны стока, обладающей граничной частотой 16,28 ГГц и максимальной частотой генерации 79,76 ГГц, которые в 1,95 и 4,64 раз превышают соответствующие величины 8,37 ГГц и 17,19 ГГц для базовой структуры.

3. В разработке структуры транзистора с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN с теплоотводящим

элементом на основе кубического нитрида бора, частично замещающим слой пассивации SiO_2 между стоком и теплопоглощающим элементом и обеспечивающим эффективное отведение избыточного тепла из активной области, характеризуемой 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. В оптимизации конструкции нормально закрытого транзистора с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ с теплоотводящими элементами на основе графена и с-BN, в результате которой его выходная мощность была увеличена на 11,35% (с 3,26 Вт до 3,63 Вт).

Экономическая значимость результатов состоит в сокращении сроков разработки и вывода на рынок новых приборов силовой электроники на основе GaN с улучшенными эксплуатационными характеристиками, в частности, с повышенным быстродействием и сниженным энергопотреблением.

Социальная значимость результатов состоит в их использовании в учебном процессе подготовке студентов, а также при проведении научных и прикладных исследований.

Результаты диссертации могут быть использованы предприятиями электронной промышленности при создании транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

По материалам диссертационной работы опубликовано 20 научных работ, из них 7 статей в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 7 статей в сборниках трудов научных конференций, 5 тезисов докладов на научных конференциях, получен 1 патент на изобретение. Опубликованные работы раскрывают основные положения, выносимые на защиту. К наиболее значимым можно отнести публикации в журналах «Semiconductors», «Доклады национальной академии наук Беларуси», «Доклады БГУИР».

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями Инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, выводам и выносимым на защиту положениям.

8. Замечания по диссертации

К недостаткам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. В главе 2 не указан ряд материалов базовой конструкции транзистора с высокой подвижностью электронов и не приведены их характеристики при моделировании, а именно: материал омических контактов стока и истока и их сопротивление, материал затвора и его высота барьера Шоттки, а также слоевое сопротивление канала (двумерного газа).

2. Остается неясным выбор состава барьерного слоя $Al_{0,14}Ga_{0,86}N$ при моделировании. При этом на странице 49 указано, что содержание алюминия в буферном слое должно составлять от 20 до 30 %.

3. Моделирование характеристик транзисторов с высокой подвижностью электронов, содержащих теплопоглощающие элементы производилось в рамках одномерной модели. Реальные структуры таких транзисторов представляют собой двумерную встречно-штыревую (гребенчатую) структуру, что уменьшает эффективность применения теплопоглощающих элементов либо делает невозможным их применение предложенным в работе образом.

4. В работе не приведен сравнительный анализ результатов моделирования с характеристиками реальных структур с теплоотводящими элементами из графена и кубического нитрида бора.

5. Имеют место замечания по оформлению диссертации: используется некорректное выражение «сток-стоковая характеристика» (обычно говорят о выходной или стоковой характеристике); «поперек базисной плоскости» (правильнее говорить перпендикулярно); параметр E_0 – уровень вакуума, приведенный на странице 61 не вынесен в перечень сокращений и обозначений; главы 3 и 4 делятся на разделы, при этом от начала главы до первого раздела содержится несколько страниц (глава 3 начинается со страницы 81, а раздел 3.1 – со страницы 85, глава 4 – со страницы 100, а раздел 4.1 – со страницы 104).

Однако приведенные выше недостатки не затрагивают основных положений и выводов, содержащихся в диссертации, и не снижают ценности полученных результатов.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

На основе анализа содержания диссертации в целом, использованных при ее выполнении методов, интерпретации полученных результатов можно заключить, что соискатель соответствует научной квалификации кандидата технических наук по искомой специальности.

10. Заключение

Диссертация **Волчка Владислава Сергеевича** является законченной квалификационной научной работой, подготовленной соискателем самостоятельно (научный руководитель – кандидат технических наук, доцент,

проректор по научной работе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники Стемпицкий В.Р.), содержащей новые научно обоснованные результаты, совокупность которых обеспечивает решение важных научных и практических задач – сокращение сроков разработки и вывода на рынок новых приборов силовой электроники на основе нитрида галлия с улучшенными эксплуатационными характеристиками, и соответствует требованиям пункта 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий. Содержание диссертационной работы полностью соответствует отрасли технических наук по профилю специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Считаю, что **Волчѣк Владислав Сергеевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах за получение новых научно обоснованных результатов по актуальному направлению научных исследований моделирование физических процессов и явлений в транзисторах с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия, включающих:

– физико-математические модели, встроенные в программный комплекс Silvaco для описания температурной зависимости теплопроводности материалов, используемых для формирования на сапфировой подложке транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры AlGa_N/AlN/GaN, позволяющие учесть уменьшение выходной мощности на 18,26% (с 5,86 Вт до 4,79 Вт) при максимальной температуре 550 К в структуре прибора, вызванное снижением теплопроводности с повышением температуры;

– разработанную структуру транзистора с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры AlGa_N/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, обладающую 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;

– разработанную структуру транзистора с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры AlGa_N/AlN/GaN с теплоотводящим элементом на основе кубического нитрида бора, частично замещающим слой

пассивации SiO_2 между стоком и теплопоглощающим элементом и обеспечивающим эффективное отведение избыточного тепла из активной области, характеризуемую 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;

– предложенную методику оптимизации геометрических параметров, заключающуюся в последовательном выполнении отсеивающего эксперимента по плану Плакетта–Бермана для определения наиболее значимых параметров и полного факторного эксперимента для нахождения оптимальных значений этих параметров, позволяющую увеличить выходную мощность нормально закрытого транзистора с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры $\text{AlGaIn}/\text{AlIn}/\text{GaIn}$ с теплоотводящими элементами на основе графена и кубического нитрида бора на 11,35% (с 3,26 Вт до 3,63 Вт).

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

Я. А. Соловьёв



Подпись Я. А. Соловьёва завершено
Упол. директ. ИТ ОО «И.А. Соловьёв»

Озкаякомиси

17.12.2024

В. Л. Волчек

