

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
Белорусского национального
технического университета,
доктор экономических наук, доцент



К. В. Якушенко

ОТЗЫВ

оппонирующей организации

на диссертационную работу **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 содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа Волчка Владислава Сергеевича посвящена разработке и исследованию способов оптимизации структур и улучшения тепловых характеристик транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия, в конструкцию которых внедрена система теплоотвода, сформированная из материалов, обладающих высокой теплопроводностью – графена и нитрида бора. Проведение диссертационных исследований основано на использовании эффективных средств компьютерного эксперимента, в частности, программного комплекса Silvaco для приборного моделирования.

Область исследования и результаты диссертационной работы соответствуют отрасли «технические науки». Задачи, содержание, полученные результаты соответствуют пункту 1 (раздел III) «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», п. 2 «Физические и технические аспекты модификации изделий и приборов по п. 1», п. 4 «Физические и математические модели изделий, устройств и технологических процессов по п. 1, в том числе для систем автоматизированного проектирования» паспорта специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи и оценка его значимости

Автор поставил целью диссертации разработку способов построения конструкции транзисторов с высокой подвижностью электронов, основанной на использовании элементов, предназначенных для отведения избыточного тепла, а также установление посредством компьютерного моделирования физических явлений, протекающих в транзисторных гетероструктурах типа AlGaN/AlN/GaN. Диссертационное исследование В. С. Волчка имеет преимущественно характер компьютерного эксперимента с привлечением приборной модели программного комплекса Silvaco. Соискатель определил ключевые конструктивно-технологические решения, обеспечивающие снижение саморазогрева, который проявляется в транзисторах с высокой подвижностью электронов. Им разработана и введена в программный комплекс Silvaco физико-математическая модель, предназначенная для описания параметров материалов, используемых в уравнении Пуассона, уравнениях непрерывности и уравнении теплового потока, с учетом температурной зависимости данных параметров. Автором разработаны структуры и выполнена оптимизация геометрических параметров транзисторов с высокой подвижностью электронов, сформированных на основе нитридов элементов третьей группы, при введении в конструкцию приборов теплоотводящих слоев. Исследованы эксплуатационные характеристики указанных транзисторов: входные и выходные электрические характеристики в непрерывном и импульсном режиме работы, а также частотные характеристики в режиме малого сигнала.

3. Конкретные научные результаты, их новизна и практическая значимость, за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Диссертация Волчка В. С. представляет собой комплексное исследование, выполненное на достаточно высоком научном уровне. Основные результаты, за которые ему может быть присуждена ученая степень кандидата технических наук, а также положения, выносимые на защиту, являются новыми и оригинальными. Наиболее значимыми среди них являются:

1. Разработана и введена в программный комплекс приборного моделирования Silvaco физико-математическая модель, предназначенная для описания параметров материалов, используемых в уравнении Пуассона, уравнениях непрерывности и уравнении теплового потока, с учетом температурной зависимости данных параметров, что позволило определить тепловые, электрические и частотные характеристики транзистора с высокой подвижностью электронов.

2. Установлены механизмы и степень влияния на малосигнальные частотные характеристики транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия теплоотводящего элемента из графена, расположенного

между теплопоглощающим элементом из графита и затвором и позволяющего снизить температуру в активной области транзистора на 19,6 градусов, повысить граничную и максимальную частоту генерации, соответственно, в 1,95 и 4,64 раз.

3. Установлено влияние дополнительного теплоотвода из активной области транзистора с высокой подвижностью электронов с помощью тонкопленочного элемента из кубического нитрида бора, частично замещающего пассивационный слой между стоком и теплопоглощающим элементом, позволяющего уменьшить максимальную температуру транзистора на 51,1 градуса и увеличить ток стока при напряжениях затвор–исток 6 В, сток–исток 30 В на 32,52 %.

4. Разработан способ оптимизации наиболее значимых геометрических параметров транзистора с высокой подвижностью электронов (толщины слоя р-AlGaN под затвором, расстояния между истоком и затвором, толщины промежуточного слоя AlN) при введении в его конструкцию теплоотводящих элементов из графена и кубического нитрида бора, применение которого позволило увеличить выходную мощность транзистора на 11,35 % с 3,26 до 3,63 Вт.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что предложенные способы компьютерного моделирования транзисторных гетероструктур и разработанные конструктивные решения транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия могут быть использованы при проектировании широкого ряда гетероструктурных приборов оптоэлектроники, силовой и СВЧ-электроники.

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

Анализ содержания диссертации Волчка В. С. позволяет сделать вывод, что соискатель обладает необходимыми знаниями в области построения и оптимизации конструкций транзисторов с высокой подвижностью электронов и компьютерного моделирования их эксплуатационных характеристик.

Все основные результаты, определяющие научную и практическую значимость работы, теоретические расчеты и интерпретация полученных данных выполнены автором лично или совместно с научным руководителем. Результаты диссертационного исследования опубликованы в авторитетных научно-технических изданиях. Всего по теме диссертации опубликовано 20 научных работ, включая 7 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК, 7 статей в других научных изданиях, 5 тезисов докладов в сборниках материалов научно-технических конференций, а также заявка на изобретение.

С учетом вышеизложенного можно заключить, что **научная квалификация Волчка В. С. соответствует искомой ученой степени кандидата технических наук.**

5. Замечания по диссертации

1. В основу диссертационного исследования автором фактически положена гипотеза о том, что для повышения эффективности функционирования транзисторов с высокой подвижностью электронов требуется снижение его рабочей температуры. На сегодняшний день известны варианты использования тонкопленочных систем в режиме регулирования или стабилизации температуры в зависимости от условий их функционирования и внешнего воздействия. В связи с этим для обоснования вышеуказанного положения принятой гипотезы целесообразно было бы не выходя за рамки принятого методического подхода – компьютерного моделирования, продемонстрировать, в качестве примера, изменение электронных свойств транзисторной гетероструктуры при повышении рабочей температуры.

2. Значимым результатом диссертационного исследования является расширение функциональных возможностей использованного программного комплекса приборного моделирования Silvaco путем введения модуля расчета теплопроводящих свойств материалов в конструкции транзистора с высокой подвижностью электронов. В диссертации описанию предлагаемого метода моделирования уделено достаточно много внимания (см. главу 2). Было бы целесообразно учесть указанное решение в качестве научной новизны, поскольку оно обладает значительной научной и практической значимостью и позволяет специалистам создавать новые конструктивные решения микроэлектронных приборов на основе рассматриваемых в работе материалов. Недостаточное внимание этому научному результату проявилось также в том, что в диссертации не представлены примеры реализации моделей теплопроводности и теплоемкости на языке программирования C, встроенные в программный комплекс Silvaco.

3. Использование теплоотводящего слоя в структуре транзистора потребовало создания комплексного решения конструкции прибора в целом. В дополнение к теплоотводящему слою автором предложено использовать достаточно массивный теплопоглощающий элемент из графита. Это подтверждено в поданной и одобренной заявке на изобретение «Нормально закрытый нитрид-галлиевый гетероструктурный транзистор с системой теплоотвода на основе графена и нитрида бора». Однако, по нашему мнению, комплексное инженерное, изобретательское решение – введение в конструкцию транзистора модуля «теплоотводящий слой – теплопоглощающий элемент», недостаточно раскрыто в тексте диссертации (например, выбор материала теплопоглощающего элемента с необходимыми параметрами, особенности технологии его получения на подложке транзистора).

4. Ряд зависимостей, представленных в виде графиков на рисунках, комментируются в тексте чересчур лаконично и явно недостаточно для подробного анализа наблюдаемого эффекта. При этом зачастую не рассматриваются причины, приводящие к наблюдаемым изменениям

параметров транзисторных структур. Например, при анализе зависимости тока стока от напряжения затвор–исток (рис. 2.4) кратко указано, что повышение концентрации ловушек в буферном слое приводит к сдвигу порогового напряжения. При этом изменение величины тока стока анализируется только при нулевых значениях напряжения затвор–исток.

5. В тексте диссертации встречаются недостаточно строгие термины и некорректные выражения: например, «выходная плотность мощности», которая определяется в ваттах на миллиметр ширины канала (стр. 9, второй абзац снизу); «...снижение температурного сопротивления на уровне интегральной схемы или корпуса...» (стр. 9, первый абзац снизу); «КТР между кремнием и системой материалов..., образующих эпитаксиальную структуру» (стр. 47, второй абзац сверху); «сдвиг порогового напряжения в положительном направлении» (стр. 75, первый абзац сверху); «передаточная проводимость» (стр. 105, подпись под рис. 4.4).

Приведенные замечания не затрагивают основных положений и выводов, содержащихся в диссертации, и не снижают значимости полученных результатов.

6. Заключение

Анализ диссертации и автореферата Волчка В. С. позволяет сделать следующее заключение.

Диссертационная работа Волчка Владислава Сергеевича «Структуры и приборное моделирование транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия с улучшенными тепловыми характеристиками» является самостоятельной квалификационной научной работой, соответствует требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к кандидатским диссертациям в области технических наук (п. 21 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий»), содержит новые научно обоснованные результаты, совокупность которых вносит вклад в развитие технологии микроэлектроники.

Соискатель Волчѣк Владислав Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах за новые научно обоснованные результаты, включающие:

- разработанную физико-математическую модель описания параметров материалов транзисторной гетероструктуры, встроенную в программный комплекс приборного моделирования Silvaco, которая позволила определить тепловые, электрические и частотные характеристики транзистора с высокой подвижностью электронов;

- разработанную структуру транзистора на основе нитрида галлия с использованием теплоотводящего элемента из графена, установленные механизмы и закономерности влияния данного элемента на малосигнальные

частотные характеристики транзистора, и обеспечивающего повышение граничной и максимальной частоты генерации, соответственно, в 1,95 и 4,64 раз;

- разработанное конструктивное решение транзистора с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN с теплоотводящим элементом из кубического нитрида бора, позволяющее уменьшить максимальную температуру транзистора на 51,1 градуса и увеличить ток стока на 32,52 %;

- разработанный способ оптимизации наиболее значимых геометрических параметров транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия при использовании теплоотводящих элементов, результатом применения которого является увеличение выходной мощности транзистора на 11,35 %.

Отзыв оппонировающей организации, подготовленный экспертом к. т. н., доцентом Гулаем А. В., назначенным приказом БНТУ № 1004 от 12.12.2024 «О подготовке отзыва оппонировающей организации», рассмотрен и утвержден на научном собрании по специальности 05.27.06 БНТУ (протокол № 1 от 18.12.2024), на котором соискатель Волчѣк В. С. выступил с докладом.

На заседании присутствовали члены научного собрания:

всего – 10 человек, из них – 1 доктор технических наук (Артюхина Н. К.), 9 кандидатов технических наук (Гулай А. В., Романюк Г. Э., Шевченко А. А., Павлюковец С. А., Бородуля А. В., Гурский Н. Н., Ковалѣва И. Л., Напрасников В. В., Червинский В. Л.).

Результаты открытого голосования по отзыву оппонировающей организации присутствовавших на заседании, которые имеют ученые степени:

«за» – 10, «против» – нет, «воздержавшихся» – нет.

Председатель научного собрания,
к. т. н., доцент

А. В. Гулай

Секретарь научного собрания,
к. т. н., доцент

Г. Э. Романюк

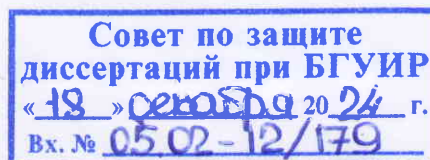
Эксперт,
к. т. н., доцент

А. В. Гулай

Дзикакомлец

18.12.2024

В. С. Волчѣк



частотные характеристики транзистора, и обеспечивающего повышение граничной и максимальной частоты генерации, соответственно, в 1,95 и 4,64 раз;

- разработанное конструктивное решение транзистора с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN с теплоотводящим элементом из кубического нитрида бора, позволяющее уменьшить максимальную температуру транзистора на 51,1 градуса и увеличить ток стока на 32,52 %;

- разработанный способ оптимизации наиболее значимых геометрических параметров транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия при использовании теплоотводящих элементов, результатом применения которого является увеличение выходной мощности транзистора на 11,35 %.

Отзыв оппонировающей организации, подготовленный экспертом к. т. н., доцентом Гулаем А. В., назначенным приказом БНТУ № 1004 от 12.12.2024 «О подготовке отзыва оппонировающей организации», рассмотрен и утвержден на научном собрании по специальности 05.27.06 БНТУ (протокол № 1 от 18.12.2024), на котором соискатель Волчѣк В. С. выступил с докладом.

На заседании присутствовали члены научного собрания:

всего – 10 человек, из них – 1 доктор технических наук (Артюхина Н. К.), 9 кандидатов технических наук (Гулай А. В., Романюк Г. Э., Шевченко А. А., Павлюковец С. А., Бородуля А. В., Гурский Н. Н., Ковалѣва И. Л., Напрасников В. В., Червинский В. Л.).

Результаты открытого голосования по отзыву оппонировающей организации присутствовавших на заседании, которые имеют ученые степени:

«за» – 10, «против» – нет, «воздержавшихся» – нет.

Председатель научного собрания,
к. т. н., доцент

А. В. Гулай

Секретарь научного собрания,
к. т. н., доцент

Г. Э. Романюк

Эксперт,
к. т. н., доцент

А. В. Гулай

Дзикакомлец

18.12.2024

[Signature] В. С. Волчѣк

