

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Лукашина Владимира Михайловича «Гетероструктурные СВЧ полевые транзисторы с селективным донорно - акцепторным легированием», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»

### **1. Актуальность темы диссертации.**

Усилители мощности и другие компоненты элементной базы СВЧ на полевых транзисторах широко и успешно используются в различных областях науки и техники. Достижения в области транзисторов на основе нитрида галлия дают повод предполагать, что традиционные мощные СВЧ полевые транзисторы на основе псевдоморфных гетероструктур с InGaAs каналом в ближайшее время будут практически полностью вытеснены из сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн приборами на основе нитрида галлия. Благодаря низкой стоимости GaAs подложек и себестоимости технологии, большому коэффициенту усиления, высокой линейности амплитудной характеристики и надежности, долговременной стабильности параметров, транзисторы с InGaAs каналом продолжают широко применяться. В России, несмотря на отдельные удачные лабораторные разработки, промышленная технология СВЧ транзисторов на GaN гетероструктурах еще далека от завершения.

В диссертации В.М. Лукашина представлены результаты исследований по разработке усовершенствованной конструкции транзисторов с InGaAs каналом в направлениях: разработки новых гетероструктур, конструкции и технологии изготовления омических контактов и затворов, конструкции и технологии изготовления дополнительных теплоотводящих элементов. Полученные результаты позволили в разы улучшить выходные характеристики транзисторов и продвинуться в мм – диапазон рабочих частот оставаясь в рамках технологии рНЕМТ гетероструктур, имеющих сравнительно низкую себестоимость. По этим причинам полученные результаты безусловно являются важными и актуальными.

### **2. Степень новизны результатов, научных положений, которые выносятся на защиту диссертации.**

В диссертация В.М. Лукашина представлен ряд новых результатов, полученных соискателем:

1. Теоретически исследованы особенности полевого разогрева электронов в НЕМТ и в DA-DpHEMT транзисторах с GaAs и InGaAs каналами, а также в НЕМТ транзисторах с GaN каналом;

2. В приближении объемных механизмов рассеяния разработана

оригинальная квантово - гидродинамическая модель полевого разогрева электронов в квантовой яме DA-DpHEMT транзисторов;

3. Показано, что сформированные с помощью селективного легирования донорами и акцепторами локализирующие барьеры в DA-DpHEMT транзисторах с InGaAs каналом и с AlGaAs - интерфейсом канала увеличивают стационарную дрейфовую скорость и всплеск дрейфовой скорости до величин, превышающих аналогичные величины в DpHEMT транзисторах с таким же InGaAs каналом и с AlInAs - интерфейсом канала до 1.5 раз;

4. В DA-DpHEMT транзисторах для см - и мм - диапазонов длин волн предложено формировать алмазоподобные теплоотводы на боковых стенках заземляющих отверстий, что позволяет до двух раз уменьшить перегрев DA-DpHEMT транзистора относительно корпуса при толщине подложки 100 мкм и ширине секций затворов 150 мкм;

5. Разработанные мощные полевые СВЧ DA-DpHEMT транзисторы для см - диапазона показали удельную выходную СВЧ мощность и коэффициент усиления в 1.5 – 2 больше, чем у полевых транзисторов на традиционных DpHEMT структурах. СВЧ DA-DpHEMT транзисторы для мм - диапазона показали малосигнальный коэффициент усиления (MSG) более 15 дБ в диапазоне частот 25 – 55 ГГц, более 10 дБ при частоте 67 ГГц;

6. Показано, что DA-DpHEMT транзисторы на основе гетероструктур с pin - потенциальными барьерами, усиливающими локализацию горячих электронов в канале транзистора при 22 % содержании индия в слое канала, позволяют получать пробивное напряжение «затвор – сток» более 30 В при увеличении расстояния затвор - сток до 0.9 мкм без падения коэффициента усиления.

**3. Обоснованность и достоверность сформулированных в работе положений, основных выводов и рекомендаций** подтверждены большим количеством экспериментов проведенным соискателем, обоснованностью теоретических предпосылок и результатами математического моделирования.

Новые результаты, полученные соискателем используются в серийно выпускаемой продукции АО «НПП «Исток» им. А.И. Шохина».

Результаты исследований достаточно широко апробированы: они докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях, отражены в монографии, статьях в периодической научной печати и патентах.

**4. Научная, практическая и экономическая значимость результатов и основных положений диссертации** заключается в предложенных автором новых идеях, реализовавшихся в конструкциях DA-DpHEMT полевых транзисторов и их элементов. Практическая значимость результатов состоит в том, что идеи и конструкции были воплощены в новых моделях и технологиях, которые позволили:

4.1. Построить модель полевого разогрева электронов в канале DA-DpHEMT транзистора, учитывающую вид поперечной волновой функции электронов в квантовой яме гетероструктуры. Модель позволяет определять перспективность использования в составе транзисторов различных вариантов гетероструктур, провести выбор оптимального состава, толщин слоев и профиля легирования в гетероструктурах;

4.2. Предложить новый тип гетероструктур, получивших название «DA-DpHEMT структуры» с потенциальными барьерами, усиливающими локализацию горячих электронов в слое канала для мощных СВЧ полевых транзисторов;

4.3. На основе DA-DpHEMT гетероструктур разработать конструкции мощных СВЧ транзисторов для см - и мм - диапазонов с учетом технологических возможностей как фото, так и электронно-лучевой литографии. Показать, что благодаря высокой точности позиционирования фотолитографического степпера можно формировать Г - затворы с длиной основания 0.12 и более мкм высокопроизводительными методами фотолитографии и, тем самым, обеспечить серийное изготовление транзисторов как для см -, так и для мм - диапазонов при рабочих частотах 10–100 ГГц;

4.4. Разработать и апробировать ряд вспомогательных технологий:

- формирование мезы транзистора с плоскими наклонными стенками;
- удаление окисленных слоев и слоев с дефектами от плазменных обработок методом окисления этих слоев и селективного удаления окислов;
- формирование в одном чипе Г – затворов при различных ориентациях козырьков относительно ножек затворов;

4.5. Повысить воспроизводимость характеристик транзисторов;

4.6. Сформировать затвор транзистора с длиной основания в 2 – 3 раза меньше, чем разрешение используемого литографического оборудования;

4.7. Увеличить выходную мощность и коэффициент усиления DpHEMT в 1,5 – 2 раза по сравнению с традиционными.

Экономическая значимость работы состоит в использовании результатов диссертации в серийном производстве, приводящего к увеличению выхода годной продукции.

## **5. Полнота опубликования основных положений, результатов диссертации.**

По материалам диссертации В.М. Лукашиным опубликованы одна монография; 33 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для защиты кандидатских и докторских диссертаций, в том числе 16 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных; 34 публикации в материалах конференций, соавторство в 9 патентах РФ.

Опубликованные работы полностью раскрывают основные положения,

выносимые на защиту. Автореферат в должной мере отражает основное содержание диссертации.

#### **6. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представляется к защите.**

Диссертационная работа В.М. Лукашина полностью соответствует специальности 2.2.2 - «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств», так как в ней решается актуальная для твердотельной электроники научная проблема: разработка конструкций и технологий для нового класса полевых СВЧ транзисторов с улучшенными характеристиками, на основе новых конструкций транзисторных наноструктур.

#### **7. Оценка оформления диссертации.**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа выполнена на 391 странице текста, содержит 111 рисунков, 19 таблиц и список литературы из 305 наименований. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с действующими требованиями ВАК РФ. Работа изложена ясным научным языком.

#### **8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.**

Объём и качество полученных результатов, а также их практическая и научная значимость позволяют сделать заключение том, что квалификация Лукашина Владимира Михайловича соответствует ученой степени доктора технических наук.

#### **9. Недостатки диссертации и автореферата.**

К недостаткам работы можно отнести определённую ограниченность представленных теоретических результатов. В частности, результаты расчета зонных диаграмм и поперечных распределений концентрации электронов можно было бы сделать более подробными, добавив результаты, получаемые при подаче на затвор более подробных наборов положительных и отрицательных потенциалов.

Технологические аспекты изготовления алмазоподобных теплопроводящих покрытий методом плазмохимического осаждения желательно подтвердить их практической реализацией, однако для проведения этих работ требуется соответствующее финансирование.

Не проведена оценка величины максимальной удельной выходной СВЧ мощности, потенциально получаемой с помощью DA-DpHEMT транзисторов на основе обращенных гетероструктур.

Отсутствует описание схем согласования входа и выхода транзисторов в микросхеме усилителя при монолитной интеграции транзистора.

## 10. Заключение.

Приведенные замечания не снижают значимости и достоверности научных результатов, полученных соискателем. Диссертация В.М. Лукашина «Гетероструктурные СВЧ полевые транзисторы с селективным донорно - акцепторным легированием» является законченной квалификационной научно-исследовательской работой. В ней решен ряд научных и технических проблем по совершенствованию гетероструктур и конструкции транзисторов, а также по совершенствованию технологии их создания, направленных на адаптацию конструкции и технологии транзисторов в серийное производство.

Диссертация Лукашина Владимира Михайловича «Гетероструктурные СВЧ полевые транзисторы с селективным донорно - акцепторным легированием» отвечает всем требованиям ВАК – п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Официальный оппонент  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник  
УНО «Электроника»  
РТУ МИРЭА

Афанасьев Михаил Сергеевич

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Подпись М.С. Афанасьева заверяю:



Почтовый индекс, адрес организации: 119454, г. Москва,  
проспект Вернадского, д.78.  
тел.: +7(499) 215-65-65,  
e-mail: [mirea@mirea.ru](mailto:mirea@mirea.ru)

Афанасьев Михаил Сергеевич  
Почтовый индекс, адрес: 109316, г. Москва, ул. Мельникова, д.3, корп.3, кв.17  
тел.: +7(906) 798-75-72  
e-mail: [michaela2005@yandex.ru](mailto:michaela2005@yandex.ru)