

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 наноэлектроники, квантовых устройств».

1. Актуальность темы диссертации.

В настоящее время решающую роль в создании и совершенствовании приборов СВЧ электроники играют полупроводниковые технологии АШВУ. Область применения электронных СВЧ приборов непрерывно расширяется. Наряду с радиолокацией, радионавигацией и радиорелейной связью, эти приборы всё шире используются в телевидении, космической связи, радиотелеметрии и других областях. В связи с этим, создание современной элементной базы СВЧ электроники приобретает стратегическое значение для технологического суверенитета России. Поэтому диссертационная работа В.М. Лукашина, в которой представлены результаты разработки конструкций и технологии нового класса полевых транзисторов: как в плане разработки не имеющих зарубежных аналогов гетероструктур с селективным донорно – акцепторным легированием и «цифровыми» слоями AlGaAs, так и в плане совершенствования технологии и конструкции транзисторов с дополнительными теплоотводящими элементами, несомненно является актуальной. Полученные результаты позволили в разы улучшить выходные характеристики транзисторов, расширить их рабочий диапазон в область мм- длин волн оставаясь в рамках технологии рНЕМТ гетероструктур. Кроме того, благодаря таким качествам как высокий коэффициент усиления, высокая линейность амплитудной характеристики, высокая надежность, долговременная стабильность параметров, сравнительно низкая себестоимость, СВЧ транзисторы на подложках из арсенида галлия еще

долго будут иметь широкое применение не только у нас, но и за рубежом. Всё это делает полученные результаты ещё более важными и актуальными.

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

В диссертации В.М. Лукашина представлен ряд новых результатов, полученных автором. Особенно следует отметить:

2.1. Разработку соискателем конструкций транзисторных гетероструктур с селективным донорно – акцепторным легированием, «цифровыми» барьерными и спейсерными слоями AlGaAs, с заданными толщинами слоев и профилями легирования (DA-DpHEMT и DA-pHEMT гетероструктуры).

2.2. Разработку на DA-DpHEMT гетероструктурах полевых транзисторов, работоспособных не только в см-, но и в мм- диапазоне длин волн, имеющих удельную выходную мощность и коэффициент усиления в 1.5 – 2 больше, чем у приборов на традиционных DpHEMT структурах.

Также были:

2.3. Предложена конструкция мезатранзистора с омическими контактами истока и стока, расположенными на стенках мезы, разработан метод и технология напыления металлизации самосовмещенных T- и Г- затворов с подавлением эффекта смыкания ножки затвора, позволяющие формировать основание затвора транзистора с длиной в 2 – 3 раза меньше, чем разрешение используемого литографического оборудования, повысить воспроизводимость характеристик транзисторов и выход годных приборов.

2.4. Предложена конструкция дополнительного теплоотводящего элемента на основе алмазоподобного покрытия, формируемого методом PECVD на стенках заземляющих отверстий, позволяющая до двух раз снизить максимальную температуру перегрева транзистора относительно корпуса.

3. Обоснованность и достоверность сформулированных в работе положений, основных выводов и рекомендаций

В работе автора было изготовлено большое количество экспериментальных образцов транзисторов с различной топологией, результаты измерения параметров которых подтверждает достоверность положений. Также основные выводы и рекомендации подтверждены расчетами, проведенными соискателем. Результаты, полученные соискателем используются в серийно выпускаемой продукции АО «НПП «Исток» им. А.И. Шохина», а теоретические предпосылки обосновываются строгостью математических моделей.

Результаты исследований хорошо апробированы: они докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях, отражены в монографии, статьях в периодической научной печати и большом числе патентов.

4. Научная, практическая и экономическая значимость результатов и основных положений диссертации

Научная значимость результатов и основных положений диссертации заключается в новых идеях, предложенных автором, реализации их в конструкциях новых конкурентоспособных полевых транзисторов и их элементов. Практическая значимость результатов состоит в том, что идеи и конструкции были реализованы в новых технологиях, которые в частности позволили:

4.1. Предложить новые типы гетероструктур, получивших название «DA-DpHEMT структуры» с потенциальными барьерами, усиливающими локализацию горячих электронов в слое канала;

4.2. На основе DA-DpHEMT гетероструктур разработать конструкции мощных СВЧ транзисторов для см - и мм - диапазонов. Показать, что благодаря высокой точности позиционирования в фотолитографическом степпере 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;

4.3. Разработать и апробировать ряд вспомогательных технологий:

- формирование мезы транзистора с плоскими наклонными стенками,
- удаление слоев с дефектами от плазменных обработок методом окисления этих слоев и селективного удаления окислов;

4.4. Повысить воспроизводимость характеристик транзисторов;

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

4.6. Получить увеличенную в 1,5 – 2 раза выходную мощность и коэффициент усиления в DA-DpHEMT транзисторах по сравнению с традиционными DpHEMT транзисторами.

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.

Основные результаты обсуждались на многих всероссийских и международных научно-технических конференциях. 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 нанoeлектроники, квантовых устройств». 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 и большое количество публикаций позволяют заключить, что квалификация Лукашина Владимира Михайловича соответствует ученой степени доктора технических наук.

9. Недостатки диссертации и автореферата.

В таблицах 1 и 3 (стр.162,163 диссертации) приведены варианты конструкции гетероструктур DA-DpHEMT. Уровень легирования указан в виде слоевой концентрации (см^{-2}) как для слоев с дельта легированием, так и для слоев с объемным легированием (акцепторный и контактные слои). Обычно для слоев с объемным легированием указывается объемная концентрация легирующей примеси (см^{-3}). Это предполагает, что слой однородно легирован по всей толщине. Почему автор использует везде слоевую концентрацию. С чем связано то, что уровень легирования указывается с различной точностью (целым числом, с точностью до десятой, с точностью до сотой).

Сравнение электрофизических параметров этих гетероструктур, приведенные в таблицах 2 и 4, также вызывает вопросы. Слишком много

параметров изменено: концентрация акцепторной примеси, уровень легирования дельта-слоев кремнием, толщина и состав канала InGaAs. Что оказало наиболее существенное влияние электрофизические параметры непонятно. Возможно, есть и другие варианты конструкции, более оптимальные.

Возможно, следовало бы привести принципиальную конструкцию гетероструктуры стандартного (серийного) DpHEMT, с которым сравнивается предложенная автором конструкция DA-DpHEMT. Также, в таблице 9 (стр.216 диссертации) приведено сравнение параметров тест – образцов разработанного DA-DpHEMT транзистора с лучшими транзисторами с похожей топологией и с близкой длиной затвора, изготовленных по другим технологиям. Результаты для DpHEMT с каналом InGaAs в таблице не приведены.

Идея введения в конструкцию транзистора и технологические аспекты изготовления алмазоподобных теплопроводящих покрытий методом плазмохимического осаждения не подтверждены их практической реализацией, однако результаты теоретического анализа показавшие уменьшение максимальной температуры транзистора в результате введения алмазоподобных теплопроводящих покрытий в заземляющие отверстия весьма убедительны.

Имеется опечатки в формулах и в тексте.

10. Заключение.

Приведенные замечания не снижают достоверности и значимости научных результатов, полученных В.М. Лукашиным. 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. Результаты работы используются в производстве транзисторов. Их использование улучшить выход годных СВЧ транзисторов.

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,
проректор по науке СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова,
технический директор ООО «Коннектор Оптикс»,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН



Егоров Антон Юрьевич
«22» мая 2023 г.

Подпись Егорова Антона Юрьевича заверяю

Ведущий специалист по кадрам
с.н. Д. В. Анискина
«22» мая 2023 г.



СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, 194021, Санкт-Петербург, улица Хлопина, дом 8, корпус 3, литер А, +7 (812) 247-44-84, office@spbau.ru
ООО «Коннектор Оптикс», 194292 Санкт-Петербург, Домостроительная ул., д.16, лит.Б, +7 (812) 327-50-55 info@connector-optics.com

Егоров Антон Юрьевич

Адрес: 191014 Санкт-Петербург, Басков пер. дом 19, кв.17

Электронная почта: egorov@spbau.ru, anton.egorov@connector-optics.com

Телефон: +7 (921) 996-41-84