Отзыв
официального оппонента

на диссертацию Лукашина Владимира Михайловича на тему «Увеличение удельной выходной мощности и коэффициента усиления DpHEMT-транзисторов за счет повышения степени локализации горячих электронов в канале», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

На сегодняшний день достигнуты значительные успехи в разработке мощных полевых транзисторов на основе широкозонных материалов, в частности нитрида галлия (GaN), но это не означает, что возможности остальных гетероструктурных полевых транзисторов исчерпаны. К ним относятся полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ) на основе арсенида галлия (GaAs), которые остаются основными активными элементами СВЧ аппаратуры различного назначения. Последнее связано с тем, что ряд физико-технологических проблем GaN транзисторов остается нерешенным.

Детальное исследование физических процессов в транзисторах и разработка математических моделей позволяют выявить основные причины, мешающие улучшению параметров транзисторов и принять меры по их устранению методом целевого изменения как исходных эпитаксиальных структур, так и конструкции самих транзисторов. Такой подход позволяет решить важные задачи повышения быстродействия и рабочих частот СВЧ транзисторов, а также увеличения их выходной мощности и КПД по добавленной мощности.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что тема оппонируемой работы и постановка задачи являются актуальными, а сама работа имеет большую практическую значимость. Автором рассмотрен широкий круг вопросов научного масштаба.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы. Содержит 127 страниц текста, 34 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 102 наименований.

Во введении дано обоснование актуальности темы работы, определены цели и задачи исследований, перечислены основные результаты, выводы и рекомендации, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту. Обоснованы необходимость теоретического анализа разогрева электронов для оптимизации профиля легирования и практическая важность работы.

В первой главе приведены результаты исследований особенностей нелокального разогрева электронов в современных гомо- и гетероструктурах.

Исследованы границы применимости температурных (квазигидродинамических) моделей полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием. В качестве эталона выбрана гидродинамическая модель. Также говорится, что динамика электронов в приборах с характерными размерами порядка десятых долей микрона, а соответственно и характеристики этих приборов, наиболее точно рассчитываются методом Монте-Карло.

Для практических расчетов выбрана квазидвумерная гидродинамическая модель.

Во второй главе представлены результаты разработки экспериментальных образцов транзисторов с локализующими барьерами.

Соискатель отмечает, что для увеличения выходной СВЧ мощности при разработке гетероструктур DpHEMT транзисторов важно обеспечить максимальную проводимость канала на участке насыщения выходных ВАХ. Одним из основных механизмов, ограничивающих эту мощность в pHEMT, является поперечный пространственный перенос электронов из InGaAs-канала гетероструктуры, возникающий при их разогреве продольным электрическим полем.

В. М. Лукашин показывает, что на практике достаточные по высоте барьеры, локализующие электроны в слое канала, наиболее просто могут быть сформированы методом донорно-акцепторного легирования широкозонных слоев AlGaAs, ограничивающих узкозонный слой InGaAs в традиционных гетероструктурах

DpHEMT.

Проведенные расчеты продольного транспорта электронов с учетом поперечного переноса позволили соискателю определить необходимую высоту локализующих барьеров — не менее 0.8 эВ. С учетом этой величины проводился расчет профиля легирования широкозонных AlGaAs-слоев.

Локализующие барьеры в экспериментальных образцах этих новых типов гетероструктур формировались с помощью полей зарядов доноров и акцепторов в AlGaAs-слоях.

Серийные ПТШ российского производства в исполнении DpHEMT на частоте 10 ГГЦ обеспечивают величину выходной СВЧ мощности не более 1 Вт/мм. Выходную СВЧ мощность в 1 Вт/мм на этой частоте обеспечивали лишь ПТШ с Г-образным затвором при длине затвора около 0.15 мкм.

При измерениях в непрерывном режиме на частоте 10 ГГЦ экспериментальные образцы транзисторов с локализующими барьерами (с трапециевидным затвором длиной 0.5 мкм) показали величину выходной мощности более 1.6 Вт/мм, коэффициент усиления более 9 дБ, КПД около 50%.

Разработанные и изготовленные в условиях серийного производства DpHEMT с локализующими барьерами, являющиеся результатом диссертационной работы, по выходным параметрам существенно превосходят лучшие зарубежные аналоги, например, транзистор TGF 2021 фирмы «TriQuint».

Проведенный в главе 2 анализ физических механизмов позволил соискателю сделать следующий вывод: меняя зонную диаграмму гетероструктуры путем введения локализующих потенциальных барьеров, можно эффективно подавлять локализацию горячих электронов в широкозонных слоях и тем самым улучшать выходные параметры транзистора.

Впервые разработаны и изготовлены экспериментальные образцы полевых СВЧ транзисторов, обеспечивающих максимум выходной СВЧ мощности при нулевом напряжении между затвором и истоком.

Соискатель предложил эффективное решение проблемы создания низкоомных омических контактов истока и стока транзисторов, возникшей в связи с введением в

гетероструктуру слоев акцепторной примеси с высоким уровнем легирования.

В **заключении** приводятся полученные при выполнении диссертационной работы научные результаты. Сформулированные на их основе четыре защищаемых положения представляются достаточно обоснованными и достоверными.

Диссертационная работа В. М. Лукашина написана хорошим языком, результаты исследований представлены достаточно полно.

По диссертационной работе можно сделать следующие критические замечания.

1. Спорными являются утверждения соискателя, что модель, основанная на методе Монте-Карло, занимает верхний уровень в иерархии моделей, так как в ней, как правило, не учитываются электрон-электронные столкновения, максвеллизирующие функцию распределения электронов.
2. По нашему мнению, вместо границ применимости температурной (квазигидродинамической) модели, которая автором не используется, соискателю следовало бы оценить погрешность, вносимую квазидвумерностью используемой гидродинамической модели.
3. При том внимании, которое соискатель уделяет математическому моделированию, представляется странным отсутствие расчетных выходных ВАХ рассматриваемого транзистора. Неубедительным представляется замечание «точный расчёт характеристик такого транзистора с субмикронным затвором выглядит крайне проблематичным» (стр. 76). Сравнение расчетных и экспериментальных ВАХ позволило бы оценить точность используемой квазидвумерной гидродинамической модели.

Несмотря на отмеченные недостатки, работа несомненно заслуживает положительной оценки. Её результаты отражены в трудах автора и докладывались на Всероссийских и Международных конференциях высокого уровня. Автореферат соответствует содержанию и выводам диссертации.

Оценивая диссертационную работу Владимира Михайловича Лукашина в целом, следует заключить, что она является законченным научным исследованием, выполненным на высоком уровне и имеющим важное прикладное значение.

На основании изложенного считаю, что работа полностью соответствует требованиям п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 30.01.2002 г. № 74 (в редакции Постановления Правительства РФ от 20.06.2011 г. № 475), а ее автор, Владимир Михайлович Лукашин, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Главный научный сотрудник
ОАО «НПП «Пульсар», д. т. н.,
профессор по кафедре информатики Г.З. Гарбер

Подпись Гарбера Геннадия Зеликовича заверяю
Ученый секретарь ОАО «НПП «Пульсар» Е.В. Каевицер

12 мая 2015 г.

Гарбер Геннадий Зеликович
105187, г. Москва, Окружной пр-д, д. 27,
8 (495) 365-12-30