

О Т З Ы В

официального оппонента, профессора факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, доктора физико-математических наук, член-корреспондента РАН Егорова Антона Юрьевича на диссертацию **Лапина Владимира Григорьевича «Новые направления создания промышленных полевых СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических по специальности 05.27.01 - твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

1 Актуальность темы диссертации.

Одним из важнейших компонентов твердотельной сверхвысокочастотной электронной компонентной базы являются монолитные усилители мощности на основе полевых транзисторов, создаваемых из гетероструктур твердых растворов Al_xSi_{1-x}V. Они используются в системах беспроводной связи, в стационарной и мобильной телекоммуникационной аппаратуре, высокоскоростной оптоволоконной связи, спутниковом и кабельном телевидении, в устройствах радиолокации при создании активных фазированных антенных решёток, радиоастрономии, телеметрии, контрольно-измерительной аппаратуры. В последние годы в мире наблюдается бурный всплеск активности в области разработки мощных полевых транзисторов на основе широкозонных материалов, особенно на гетероструктурах на основе нитрида галлия, алюминия и индия. Эти материалы обладают рядом свойств, позволяющих получать высокие характеристики СВЧ полевых транзисторов, такие как удельная выходная мощность, коэффициент усиления и коэффициент полезного действия. В РФ также ведутся активные разработки транзисторов на их основе. Однако в настоящее время промышленная технология изготовления полевых транзисторов

на основе нитрида галлия в РФ находится на этапе становления, и сегодня видно, что потребуется ещё по крайне мере несколько лет до её внедрения в серийное производство, а также значительные финансовые вложения. В современных условиях санкций и информационной борьбы данное обстоятельство может плохо отразится на обороноспособности РФ и на ее конкурентоспособности в области высоких технологий. В то же время РФ обладает промышленной технологией изготовления полевых транзисторов на основе твердых растворов арсенида галлия, алюминия и индия, которые в настоящее время являются основным компонентами устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Благодаря таким качествам как высокий коэффициент усиления, высокая линейность амплитудной характеристики, высокая надежность, долговременная стабильность и отработанная технология изготовления, промышленные СВЧ транзисторы на основе арсенида галлия, алюминия и индия еще долго будут иметь широкое применение не только у нас, но и за рубежом. И не случайно, что с момента их появления и до сих пор во всем мире ведутся исследования, направленные на улучшение параметров таких полупроводниковых приборов. Следует отметить, что СВЧ МИС на основе арсенида галлия до сих пор занимают большую часть СВЧ рынка.

В связи с вышесказанным, диссертационная работа В.Г. Лапина «Новые направления создания промышленных полевых СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия», в которой представлены результаты совершенствования конструкций промышленных полевых транзисторов в как в плане совершенствование конструкций и технологии изготовления затворов, так и в плане разработки новых не имеющих на западе аналогов гетероструктур с донорно–акцепторным легированием, несомненно, является актуальной и важной для сохранения конкурентоспособности РФ в области высоких технологий и обеспечения обороноспособности государства.

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

В диссертации В.Г. Лапина представлен ряд новых результатов, полученных автором.

Особенно следует отметить:

- предложение соискателем нового принципа создания гетероструктур полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе арсенида галлия с применением метода донорно–акцепторного легирования;
- разработку новых конструкций гетероструктур полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе арсенида галлия, в том числе с донорно–акцепторным легированием;
- разработку новых конструкций полевых транзисторов на основе гетероструктур с донорно–акцепторным легированием, в том числе имеющих удельную выходную мощность и коэффициент усиления в 1.5 – 2 больше чем у приборов на традиционных гетероструктурах с двусторонним легированием канала (DpHEMT).
- разработку метода и технологии наклонного напыления самосовмещенных затворных электродов, позволяющие существенно повысить точность смещения затвора к истоку транзистора и повысить выход годных приборов;
- предложение соискателем оригинальной конструкции Г - образного затвора, позволяющие формировать затвор транзистора, посредством технологии наклонного напыления, с длиной в 2 – 3 раза меньше, чем разрешение используемого литографического оборудования, повысить воспроизводимость характеристик транзисторов и увеличить выход годных изделий.

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

Результаты исследований, приведенные в диссертационной работе В.Г. Лапина, хорошо апробированы: докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях; опубликованы в рецензируемых периодических научно-технических журналах, в том числе индексируемых в международных базах; отражены в монографии; права на результаты интеллектуальной деятельности защищены целым рядом патентов.

Для проверки обоснованности и достоверности сформулированных в работе положений, автором было проведено большое количество экспериментальных исследований в области создания и исследования характеристик новых промышленных полевых СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия, которые подтвердили достоверность предложенных автором научных идей и проведенных теоретических расчетов.

Новые результаты, полученных соискателем уже частично используются в серийно выпускаемой продукции АО «НПП «Исток» им. А.И. Шохина», а часть внедрена в экспериментальное производство.

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 позволили: повысить воспроизводимость характеристик транзисторов; сформировать затвор

транзистора с длиной в 2 – 3 раза меньше, чем разрешение используемого литографического оборудования; повысить точность формирования затвора; для нового типа транзисторов (DрНЕМТ) увеличить выходную мощность и коэффициент усиления в 1,5 – 2 раза по сравнению с традиционными.

Экономическая значимость работы состоит в том, что применение результатов диссертации на практике повысило выход годных транзисторов в четыре раза (с 5% - 10% до 20% - 40 %) и внедрении результатов работы в серийное производство.

5 Полнота опубликования основных положений, результатов диссертации.

По материалам диссертации В.Г. Лапиным опубликованы одна монография в зарубежном издаельстве, 10 статей в российских научных журналах, индексируемых в международных базах данных; 23 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для защиты кандидатских и докторских диссертаций; 29 работ в других научных изданиях; получено 15 патентов РФ.

Основные результаты обсуждались на многих всероссийских и международных научно-технических конференциях. Опубликованные работы полностью раскрывают основные положения, выносимые на защиту. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации.

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

Диссертационная работа В.Г. Лапина полностью соответствует специальности 05.27.01 — твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах. В ней

решается актуальная для твердотельной электроники научная проблема: разработка новых направлений создания промышленных полевых СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия с улучшенными характеристиками, в том числе с совершенствованием транзисторных гетероструктур.

7 Оценка оформления диссертации.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа выполнена на 349 страницах текста, содержит 95 рисунков, 24 таблицы и список литературы из 258 наименований.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с действующими требованиями ВАК РФ. Работа изложена ясным и понятным научным языком.

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

Объём и качество полученных результатов, большое количество публикаций, а также их практическая и научная значимость позволяют сделать вывод о том, что квалификация Лапина Владимира Григорьевича соответствует ученой степени доктора технических наук.

9 Недостатки диссертации и автореферата.

В разделе 3.3 диссертации сравниваются характеристики DA-D_pHEMT и D_pHEMT транзисторов. Конструкция гетероструктуры DA-D_pHEMT приведена в разделе, а конструкция D_pHEMT отсутствует. Для более корректного сравнения,

было бы правильно привести также и конкретную конструкцию гетероструктуры DрHEMT.

В Таблицах 18 и 23 диссертации приведены параметры слоев гетероструктуры DA-DрHEMT. Кремний указан как материал донорной примеси, а информация о материале используемого для создания акцепторной примеси отсутствует. Какой элемент использовался как акцепторная примесь при создании гетероструктуры DA-DрHEMT?

В диссертации и автореферате (разд. 3.7) сообщается, что транзисторы были смонтированы в тестовые измерительные схемы двух типов. Не сообщается в чем различие двух типов измерительные схемы, а фотографии, приведенные в диссертации, слишком мелкие, чтобы судить о конструкции измерительных схем.

На рисунке 3 автореферата приведена зонная диаграмма в DA-DрHEMT структуре с контактом Шоттки в сравнении с Ec(x)- зонной диаграммой DрHEMT структуры с контактом Шоттки. EF0- положение уровня Ферми. В тексте отмечается, что «...показано, что в этом случае зонные диаграммы практически одинаковы в областях слоя канала, сглаживающих слоев, спейсеров и матриц...», в чем собственно различия и преимущества приведенной на рисунке DA-DрHEMT структуры не обсуждаются.

В диссертации приведен список сокращений, в автореферате список отсутствует. Наличие списка сокращений для основных понятий, например для DA-DрHEMT облегчило бы чтение автореферата.

Имеется ряд опечаток в формулах и в тексте.

10 Заключение.

Диссертация работа «Новые направления создания промышленных полевых СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия», представленная соискателем, является законченной квалификационной научно-исследовательской работой. В ней решен ряд научных и технических проблем по

совершенствованию промышленных полевых транзисторов. Разработаны новые конструкции и технологии изготовления затворов. Разработаны транзисторы нового типа на основе предложенных соискателем гетероструктур. Результаты работы внедрены в производство, в том числе и серийное. Их использование позволило несколько раз улучшить выходные характеристики СВЧ транзисторов. Замечания, приведенные в предыдущем разделе отзыва, не снижают значимости научных результатов, полученных В.Г. Лапиным.

Диссертация Лапина Владимира Григорьевича «Новые направления создания промышленных полевых СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия» 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 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент,
профессор факультета лазерной
фотоники и оптоэлектроники Санкт-
Петербургского национального
исследовательского университета
информационных технологий,
механики и оптики,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

Егоров Антон Юрьевич
«13» мая 2019 г.



Подпись Егорова Антона Юрьевича заверяю

Егоров Антон Юрьевич
14.05.2019

Адрес организации: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49
Телефон: +7 (812) 232-97-04, Электронная почта: od@mail.ifmo.ru