Отзыв

о ф и ц и а л ь н о г о о п п о н е н т а

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».

Повышение быстродействия и рабочих частот полупроводниковых приборов, а также увеличение их выходной мощности и коэффициента полезного действия является одной из основных задач современной сверхвысокочастотной электроники. Несмотря на то, что элементарная твердотельная база постоянно совершенствуется, основными активными элементами в диапазоне частот от единиц до сотен гигагерц остаются полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ) на арсениде галлия, других соединениях A_3B_5 и различных гетероструктурах на их основе. На сегодняшний день достигнуты значительные успехи в разработке мощных полевых транзисторов на основе широкозонных материалов, таких, например, как GaN, но это не означает, однако, что возможности обычных гетероструктурных транзисторов исчерпаны. Последнее связано с тем, что, несмотря на большое количество работ по их совершенствованию и сообщений о достижении рекордных результатов, ряд вопросов, связанных с физикой их работы, остается недостаточно исследованным.

Разработка математических моделей и исследование физических процессов, определяющих быстродействие и энергетические характеристики полевых транзисторов, позволяют улучшить их выходные СВЧ характеристики путем оптимизации исходных эпитаксиальных структур и конструкций транзисторов.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что тема рецензируемой работы безусловно актуальна, а сама она имеет большую практическую значимость. Автором рассмотрен широкий круг вопросов, представляющих собой законченное цельное исследование.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы. Работа выполнена на 127 страницах текста, содержит 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, научные положения, выносимые на защиту. Обоснована необходимость теоретического анализа разогрева электронов для задания приближенного к оптимальному профиля легирования в локализующих барьерах и практическая важность работы.

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

Автором проводится исследование границ применимости квазигидродинамических моделей для расчета полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием. В связи с тем, что в настоящее время в большинстве полевых СВЧ транзисторов размеры активной области становятся сравнимыми с длинами релаксации импульса и энергии электронова сами длины релаксации из-за сложного распределения электрического поля могут, в свою очередь, сильно меняться по длине в промежутке между истоком и стоком, строгое определение границ применимости тех или других физических моделей до сих пор остается серьезной проблемой: простые критерии по сравнению размеров пролетной области с длинами релаксации электронов не позволяют оценить точность моделей, и для этого приходится непосредственно использовать численные расчеты. Относительно малая вычислительная ресурсоемкость гидродинамической модели (ГДМ) привела к тому, что на практике основными расчетными моделями пока остаются ее различные модификации. При этом минимальной вычислительной

предполагает, что если уменьшить роль рассеяния электронов в широкозонном слое (например, создав потенциальные барьеры, усиливающие локализацию электронов в канале), то в транзисторе при открытии канала СВЧ сигналом можно добиться перемещения статического домена от затвора к стоку и уменьшения тепловой нагрузки в режиме большого сигнала.

Показано, что несмотря на большую величину максимума полевой зависимости статической дрейфовой скорости, быстродействие GaN - ПТШ не выше быстродействия GaAs - ПТШ даже при искусственном задании величины слабополевой подвижности электронов в GaAs такой же, как в GaN и, соответственно, гораздо ниже быстродействия pHEMT. Этот эффект связан с тем, что из-за большой энергии оптического фонона, дрейфовая скорость электронов в максимуме на ее распределении в GaN - ПТШ заметно ниже, чем в GaAs - ПТШ. Поэтому зависимости частоты усиления по току от длины затвора показали, что транзисторы на основе GaAs быстрее, чем транзисторы на основе GaN, даже при задании равных и малых величин подвижности электронов. В отличие от GaAs - ПТШ, из-за малых времен релаксации по энергии ТМ применимы для расчета GaN - ПТШ даже с короткими субмикронными затворами (формально, до длин затвора 0.05 мкм).

Во второй главе представлены результаты разработки транзисторов с локализующими барьерами в исполнении (DA)-DpHEMT.

Для увеличения выходной СВЧ мощности при разработке гетероструктур для DpHEMT транзисторов важно обеспечить максимальную проводимость канала на участке насыщения выходных ВАХ. Оптимизация с этой целью гетероструктур для мощных pHEMT и DpHEMT сдерживается набором жестких физических и технологических ограничений, которые не позволяют получать удельную выходную мощность серийных ПТШ заметно больше 1 Вт/мм на частоте 10 ГГц. 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.

ресурсоемкостью обладают температурные модели (ТМ), отличающиеся тем, что в них при расчетах не учитывается инерционность изменения импульса. Это делает их весьма привлекательными, но важно найти границы физически адекватной применимости ТМ в сравнении с ГДМ.

В работе показано, что в полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием пренебрежение при расчетах инерционностью изменения импульса приводит к существенным (более 20%) погрешностям в распределениях дрейфовой скорости по длине канала транзистора и в его выходных характеристиках при характерных длинах активной области намного превышающих длину релаксации импульса электронов. Эти погрешности усиливаются сильными продольными градиентами электрического поля в канале, особенностями нелокального разогрева электронов и специфическим для pHEMT транзисторов эффектом – сильным поперечным пространственным переносом горячих электронов через границу гетероперехода при открытом канале. Поперечный пространственный перенос электронов приводит к увеличению концентрации электронов в широкозонном слое, примыкающему к слою канала. Разница в результатах расчетов по ГДМ и ТМ велика для транзисторов с открытым каналом даже при сравнительно больших длинах затвора - порядка 1 мкм. Объясняется это тем, что поперечные размеры квантовой ямы в канале всегда меньше длины релаксации импульса, при этом поперечные потоки электронов через гетерограницу достаточно велики даже при слабых продольных полях.

Результаты проведенных автором расчетов характеристик полевых транзисторов на основе гетеростуктур $In_{0,52}Al_{0,48}As$ -$In_{0,53}Ga_{0,47}As$ оказались гораздо более чувствительными к выбору вида модели, чем результаты расчетов для полевых транзисторов на основе гетеростуктур $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ – GaAs. Причину автор видит в сравнительно большей подвижности электронов в канале и сравнительно большей величине разрыва дна зоны проводимости на границе гетероперехода в $In_{0,52}Al_{0,48}As$ - $In_{0,53}Ga_{0,47}As$.

Показано, что именно поперечный пространственный перенос приводит к жесткой локализации домена сильного поля у стокового края затвора. Автор

Он приводит к усилению заполнения горячими электронами слоев AlGaAs вблизи доноров, что снижает подвижность горячих электронов. Типичная величина разрыва дна зоны проводимости на гетерогранице AlGaAs-InGaAs в pHEMT и в DpHEMT сравнительно мала и составляет примерно 0,3 эВ. Такой глубины потенциальной ямы InGaAs-канала недостаточно для сохранения преимущественной локализации электронов в InGaAs - канале при их сильном разогреве, характерном для работы pHEMT и DpHEMT.

Проведенный в работе анализ методов создания достаточно высоких и резких локализующих потенциальных барьеров показал, что оптимальноым методом их создания является донорно(Si) - акцепторное(Be) легирование широкозонных слоев в уже освоенных в производстве традиционных DpHEMT гетероструктурах.

Достаточные по высоте локализующие барьеры в (DA)-DpHEMT гетероструктурах формировались с помощью встроенных полей зарядов доноров и акцепторов в $Al_xGa_{1-x}As$ – слоях, где задавался $p-i-n$ профиль легирования при избыточном легировании донорами. Использовалась технология дельта-легирования донорами ($\delta:Si$), дающая максимальную локализацию горячих электронов в слое InGaAs-канала. При этом каждый $\delta:Si$ - слой выполняет двойную функцию: участвует в формировании локализующего барьера и обеспечивает поставку электронов в InGaAs-канал.

Преимущества (DA)-DpHEMT гетероструктуры перед традиционной DpHEMT гетероструктурой:

- уменьшение рассеяния горячих электронов в широкозонном материале за счет уменьшения толщины слоя широкозонного материала, в котором они могут находиться;

- увеличение поверхностной плотности электронов в сравнительно более узкой и глубокой квантовой яме канала;

- уменьшение туннельного переноса электронов между затвором и каналом за счет увеличения средней толщины потенциального барьера контакта Шоттки;

- уменьшение поверхностной плотности горячих электронов в широкозонных слоях и улучшение управления током стока при больших прямых смещениях

контакта Шоттки.

В разделе представлены результаты измерений характеристик экспериментальных образцов ПТШ в исполнении (DA)-DpHEMT. Для первых экспериментов изготавливались транзисторы с трапециевидным, а не с Т-образным или Г-образным затвором. Экспериментальные образцы ПТШ с трапециевидным затвором длиной 0.5 мкм показали при измерениях на частоте 10 ГГЦ в непрерывном режиме величину удельной выходной мощности более 1,6 Вт/мм, коэффициент усиления более 9 дБ, КПД около 50%. При этом серийные ПТШ в исполнении DpHEMT на частоте 10 ГГц обеспечивали величину удельной выходной СВЧ мощности менее 1 Вт/мм (обычно 0,8 ÷ 0,9 Вт/мм). Удельную выходную СВЧ мощность в 1 Вт/мм обеспечивали лишь ПТШ с Г-образным затвором при длине затвора около 0,15 мкм.

Проведенный в работе анализ физических механизмов, позволивших получить столь значительный рост выходных параметров, позволяют сделать вывод, что введение локализующих потенциальных барьеров резко уменьшает влияние поперечного переноса электронов и подавляет паразитные каналы проводимости по широкозонным слоям в (DA)-DpHEMT, а интенсивность рассеяния заметно падает за счет квантовых эффектов. Оценки также позволяют автору сделать вывод о том, что улучшение омических контактов, применение Т- образного или Г- образного затвора длиной менее 0,25 мкм дополнительно увеличат мощность, дадут заметное увеличение коэффициента усиления и КПД и позволят на частоте 10 ГГц выйти на следующий уровень по параметрам транзисторов: удельная мощность более 2,5 Вт/мм, коэффициент усиления в насыщении более 13 дБ, КПД при настройке на максимальную мощность 55 ÷ 60%.

Впервые в результате разработки изготовлены ПТШ в исполнении (DA)-DpHEMT, обеспечивающие максимум выходной СВЧ мощности при задании напряжения «затвор – исток», равного нулю.

Найдено решение проблемы создания низкоомных омических контактов к стоку и истоку (DA)-DpHEMT, возникших в связи с введением в структуру

локализующих барьеров. Для улучшения омических контактов была изготовлена конструкция транзистора с заглублением положения нижней границы металлизации омического контакта под слой InGaAs -канала. Исходное заглубление в структуре формировалось методом анизотропного травления, что позволило сформировать его стенки с боковым наклоном. Геометрия боковых стенок заглубления при напылении обеспечивает их бездефектное покрытие металлом и формирование омического контакта непосредственно к рекристаллизованному InGaAs – слою канала транзистора, имеющему выход на боковых стенках. Изготовленные омические контакты имеют линейные ВАХ и малое переходное сопротивление - не хуже омических контактов в ПТШ традиционного DpHEMT исполнения.

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

Диссертационная работа Лукашина В.М. написана на хорошем русском языке, результаты исследований представлены ясно и понятно. Полученные результаты качественно и количественно согласуются с известными экспериментальными и теоретическими данными, а сформулированные выводы взаимно согласованы и внутренне непротиворечивы.

В целом исследования, проведенные в работе, вносят существенный вклад в в понимание физики электронных процессов, происходящих в мощных полевых СВЧ транзисторах. Основные результаты и выводы работы могут быть использованы при разработке и исследовании приборов и устройств на их основе.

К недостаткам работы можно отнести то, что не все результаты обсуждаются с одинаковой степенью подробности.

Очень коротко описаны исследования процесса формирования омического контакта. Не указан метод измерения сопротивления контактов, не приводятся вольт-амперные характеристики каналов сток-исток.

На странице 72, обосновывая невозможность использования в качестве локализирующего барьера слоя $Al_xGa_{1-x}As$ с большим содержанием алюминия ($x>0,35$), одной из причин автор называет формирование в этом слое глубоких DX -

центров, захватывающих электроны, что не соответствует известным данным о природе и свойствах DX-центров, которые образуются в следствие бистабильного поведения примесей с отрицательной корреляционной энергией, к которым относятся и донорные примеси 4 группы (Ge, Si) в соединениях A_3B_5. Поэтому в нелегированном AlGaAs DX-центров нет.

Несмотря на отмеченные отдельные недостатки, работа в целом 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 Лукашина Владимира Михайловича в целом, следует заключить, что она является законченным научным исследованием, выполненным на высоком уровне и имеющем большое прикладное значение. 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 заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Заведующий лабораторией ФИРЭ
им. В.А. Котельникова РАН, к.ф.-м.н. В.И. Борисов

Подпись Борисова В.И. Заверяю.
зам. директора ФИРЭ им. А.В. Медведь
В.А. Котельникова РАН, д.ф.-м.н.

24 апреля 2015 г.

Борисов Виталий Иванович
141190, г. Фрязино, Моск. обл., пл. Введенского 1,
+7(496)565-26-85