

ОТЗЫВ официального оппонента

кандидата физико-математических наук Сизова Владимира Евгеньевича на диссертационную работу Маковецкой Алёны Александровны «Исследование динамики горячих электронов в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием для разработки перспективных СВЧ усилителей мощности», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 - «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Актуальность темы диссертации

Арсенид- и нитридгаллиевые гетероструктуры с двумерным электронным газом широко используются для создания СВЧ-транзисторов. СВЧ-транзисторы типа рHEMT (pseudomorphic high electron mobility transistor) на основе псевдоморфных AlGaAs-InGaAs-GaAs-гетероструктур и типа НЕМТ на основе AlGaN-GaN-гетероструктур являются ключевыми элементами устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов, и поэтому во всем мире активно ведутся исследования, направленные на совершенствование конструкции и улучшение электрофизических параметров гетероструктур. Одним из перспективных методов улучшения характеристик гетероструктур является впервые в мире предложенный в АО «НПП «Исток» им. Шокина» способ формирования высоких потенциальных барьеров для электронов в канале транзистора, заключающийся в введении в рHEMT гетероструктуру с двойным легированием донорами (DрHEMT) дополнительных тонких акцепторных слоев, позволивший на 50% увеличить удельную выходную мощность транзисторов на арсениде галлия. Предложенный метод может быть применен и для GaN-транзисторов, имеющих более высокие удельные мощности по сравнению с GaAs приборами, – введение высокого потенциального барьера со стороны буфера может решить проблемы управляемости GaN приборов. Однако технология производства GaN транзисторов в России развита недостаточно, поэтому для сохранения конкурентоспособности необходимо развивать параллельно оба направления.

Диссертационная работа Маковецкой А.А. посвящена исследованию динамики горячих электронов в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием (DA-DрHEMT) с целью их дальнейшего совершенствования и вопросам их практического применения в СВЧ усилителях мощности.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что тема диссертационной работы, безусловно, актуальна, а сама работа имеет большую практическую значимость.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе

Степень достоверности и обоснованности полученных результатов, научных положений, заключений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается использованием хорошо известных методов исследований, математических моделей, в том числе нелинейных моделей полевых транзисторов с учетом их границ применимости, а также программ моделирования отработанных на большом объеме экспериментальных данных. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями. Результаты проведенного теоретического исследования температурного режима транзисторов были подтверждены характеристиками разработанного усилительного каскада на DA-DрHEMT с шириной затвора 4,8 мм, сохранившем преимущество по выходной мощности по сравнению с DрHEMT, аналогично транзистору с шириной затвора 0,8 мм. Эффективность предложенного автором метода измерений характеристик транзисторов подтверждается результатами, полученными при разработке серийных СВЧ усилителей мощности с требуемыми характеристиками на основе построенных автором нелинейных моделей DрHEMT с различной шириной затвора и топологией.

Значимость для науки и практики результатов исследований

В рецензируемой работе необходимо отметить следующие научные и практические результаты:

1. На основе теоретико-экспериментальной работы показано, что уменьшение поперечного пространственного переноса и усиление размерного квантования в DA-DрHEMT приводят к увеличению в 1,4 – 1,6 раза их средней дрейфовой скорости под затвором и, соответственно, максимальной рабочей частоты транзистора по сравнению с DрHEMT.
2. Показано, что в условиях резкого уменьшения поперечного пространственного переноса происходит перемещение домена сильного поля в канале DA-DрHEMT от затвора к стоку и обратно за период СВЧ колебания, что расширяет область тепловыделения и снижает на величину до 20% максимальный перегрев транзистора относительно температуры корпуса. Этой особенностью распределения мощности тепловыделения нового типа прибора обусловлен, в частности, экспериментально доказанный факт того, что при увеличении общей ширины затвора транзистора с 0,8 до 4,8 мм сохраняется преимущество более чем в 1,5 раза по удельной выходной мощности DA-DрHEMT перед DрHEMT.

3. Разработана схема согласования для DA-DрHEMT и проведены экспериментальные исследования, показавшие, что использование донорно-акцепторного легирования в арсенидгаллиевых гетероструктурных полевых транзисторах позволяет создавать в X-диапазоне частот усилители с выходной мощностью более 5 Вт в рабочей полосе частот более 25%, что соответствует удельной выходной мощности более 1 Вт на миллиметр ширины затвора. Сочетание этих трех параметров в усилительном каскаде является результатом, находящимся на уровне лучших мировых достижений в области разработки усилителей мощности на основе GaAs полевых транзисторов.
4. Результаты, полученные автором на основе теоретических и экспериментальных исследований характеристик DA-DрHEMT, позволяют проектировать полевые транзисторы с повышенной выходной мощностью и коэффициентом усиления в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, а также создавать на их основе перспективные СВЧ усилители мощности.
5. Предложен метод измерений СВЧ характеристик дискретных полевых транзисторов в согласующих микрополосковых схемах с регулируемым импедансом, на основе которого разработана методика оперативного определения параметров их нелинейных моделей. Предложенный метод измерений позволяет повысить точность построения нелинейных моделей транзисторов в X-диапазоне частот, как за счет уменьшения погрешности, связанной с неточностью контактирования и краевыми эффектами, так и за счет измерений транзистора в условиях согласования с измерительным трактом. Данная методика позволяет проводить верификацию модели по коэффициенту усиления и мощности в различных цепях согласования для одного и того же экземпляра транзистора.
6. Исследованы основные факторы, вносящие погрешность в результаты численного анализа мощных усилительных каскадов на основе согласующих схем, выполненных на керамике с высокой диэлектрической проницаемостью (бериллий-самарий-стронций – БСТ), и предложены способы их учета при проектировании УМ.
7. Разработанная методика построения нелинейных моделей позволяет за короткое время и с минимальными затратами разрабатывать выпускаемые мелкими сериями ВСТ и УМ в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн на основе полевых транзисторов с параметрами, существенно изменяющимися от партии к партии.
8. На основе предложенной методики построения нелинейных моделей и с учетом особенностей гибридных схем, в состав которых входит керамика БСТ, разработан ряд ВСТ и гибридно-интегральных транзисторных УМ с характеристиками, соответствующими мировым аналогам, в том числе и для модулей АФАР.

Структура, объем и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы. Текст диссертации содержит 172 страницы машинописного текста, 73 рисунка, 9 таблиц, список литературы из 138 наименований, а также 1 приложение, в котором отражен личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве.

В первой главе приведены результаты исследований особенностей динамики горячих электронов в полевых транзисторах на основе арсенидгаллиевых (DA-DpHEMT и DpHEMT) и нитридгаллиевых гетероструктур.

Во введении и первом разделе главы приведен обзор методов совершенствования полупроводниковых структур для СВЧ полевых транзисторов. Одним из путей улучшения характеристик арсенидгаллиевых гетероструктур является формирование в слоях, образующих канал транзистора, высоких потенциальных барьеров, ограничивающих нахождение горячих электронов в широкозонном материале. Создание высоких потенциальных барьеров с малой длиной нарастания является сложной технологической проблемой, которую удалось решить для псевдоморфной гетероструктуры благодаря введению выше и ниже InGaAs канала тонких слоев, легированных донорами и акцепторами и разделенными нелегированной прослойкой. Мощные полевые транзисторы на такой гетероструктуре были названы DA-DpHEMT (donor- acceptor double pseudomorphic high electron mobility transistor). Апробация и исследования нового типа прибора были проведены на топологии мощного серийного транзистора АО «НПП «Исток» им. Шокина».

В последующих разделах автор приводит большой объем экспериментальных данных по измерению характеристик DA-DpHEMT как на постоянном токе, так и на большом и малом входном СВЧ сигнале.

Маковецкой А.А. на основе квазигидродинамического моделирования и экспериментальных исследований DA-DpHEMT на малом СВЧ сигнале впервые показано, что увеличение средней дрейфовой скорости под затвором транзистора, а, следовательно, и улучшение его частотных свойств, связано с двумя основными механизмами:

-уменьшением интенсивности поперечного перемещения электронов из узкозонного слоя канала в широкозонные слои гетероструктуры за счет введения высоких локализующих барьеров;

-усилением размерно-квантовых эффектов, за счет которых в глубокой квантовой яме структуры образуется 10-15 разрешенных квантовый уровней с расстоянием между ними более 50 мэВ. Это расстояние больше величины энергии оптического фонона в InGaAs канале(35мэВ), что означает снижение рассеяния горячих электронов на данном виде квазичастиц в узкозонном материале.

На основе той же гидродинамической модели, но с включением уравнений, описывающих мощность тепловыделения в канале транзистора, Маковецкой А.А. было проведено исследование температурного режима

работы нового типа прибора. Показано, что за жесткую локализацию домена сильного поля у стокового края затвора в гетероструктурных полевых транзисторах отвечает поперечный пространственный перенос электронов между слоями гетероструктуры. Впервые показано, что в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием из-за существенного уменьшения роли поперечного пространственного переноса возможна перестройка статического домена, как и в обычных гомоструктурных транзисторах, что снижает максимальный перегрев прибора относительно температуры корпуса на величину до 20%.

На основе одномерного гидродинамического моделирования упрощенной гетероструктуры, состоящей из двух слоев и имеющей ступенчатый профиль легирования показано, что из-за более сильного всплеска дрейфовой скорости ее средняя величина под затвором прибора на основе GaAs при высоких величинах подвижности ($\mu=8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) почти вдвое превосходит величину средней дрейфовой скорости в транзисторе на основе GaN ($\mu=1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), и не ниже её даже при одинаковой величине подвижности электронов (если сделать $\mu=1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ у обоих материалов), несмотря на гораздо более высокие значения статической скорости электронов в GaN в сильных полях. Показано, что это связано со значительным отличием времен релаксации по энергии в приборах на рассматриваемых материалах, которое объясняется разницей в массах входящих в данные полупроводники атомов. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что быстродействие GaN транзисторов при прочих равных условиях будет не выше быстродействия полевых транзисторов на основе GaAs.

Во второй главе приведен обзор современных методик построения нелинейных моделей полевых транзисторов и методов проектирования СВЧ УМ на их основе, их достоинства и недостатки. Изложены трудности, возникающие при моделировании полевых транзисторов и проектировании гибридных УМ, связанные с конструкцией современного мощного полевого транзистора с большой шириной затвора и особенностями процесса сборки.

Маковецкой А.А. впервые предложен экономичный и сравнительно простой метод достижения достаточной точности нелинейных моделей дискретных полевых транзисторов для проектирования гибридных УМ, основанный на разработанной автором тестовой схеме с регулируемым импедансом. Предложенный метод заключается в измерениях характеристик прибора в двух вариантах конфигурации тестовой схемы: в 50-Омных линиях и резонансной цепи, настроенной на максимум коэффициента передачи, и использовании этих двух наборов измерений для определения параметров нелинейной модели. Особенностью предложенного подхода является то, что один и тот же транзистор с неизменными особенностями монтажа может измеряться не только в 50-Омных линиях, но и в различных согласующих схемах, что позволяет проводить верификацию модели по максимальным выходным параметрам в требуемой полосе частот:

коэффициенту усиления, мощности и КПД, конфигурируя соответствующим образом тестовую схему.

Автором проведен большой объем работ по выявлению причин, влияющих на точность проектирования гибридных УМ в Х- и Ки-диапазонах, использующих связанные микрополосковые линии на керамике с высокой диэлектрической проницаемостью в качестве согласующих элементов. К ним относятся промахи в задании длин проволок монтажа транзисторов, связанные с особенностями процесса сборки гибридных УМ, а также трехмерные неоднородности (края плат, переходы с плату на плату, зазоры между платами, заполненные припоеем или воздухом), не учитывающиеся при двумерном электродинамическом моделировании в современных системах автоматизированного проектирования, ориентированных в основном на монолитные схемы. Показана значительная степень влияния этих особенностей на выходные характеристики гибридных схем и предложены методы их учета.

Приведены результаты разработки трех мощных серийных усилителей Х-диапазона и одного опытного усилителя Ки-диапазона для передающих каналов АФАР на основе нелинейных моделей полевых транзисторов, построенных с помощью предложенной автором методики.

Особенно ярко достоинства новой методики отражают характеристики десятиваттного усилителя Х-диапазона, который изначально был разработан на основе нелинейной модели, построенной по измерениям характеристик транзистора в 50-Омной линии, а затем модернизирован с помощью предложенной автором методики. Модернизированный вариант усилителя обладает выходной мощностью в 1,2 раза выше, чем исходный, и включает в себя транзисторы, суммарная ширина затворов которых в 1,5 раза меньше. Хотя стоит заметить, что столь большой выигрыш в выходных параметрах, скорее всего, обусловлен двумя факторами: уточнением нелинейной модели транзистора и учетом особенностей гибридных схем, которые также не были учтены в исходном варианте усилителя.

В последнем разделе главы (2.5.) приведены разработанные автором усилительные каскады на основе полевых транзисторов на гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием. Показано, что использование донорно-акцепторного легирования в арсенидгаллиевых гетероструктурных полевых транзисторах позволяет создавать в Х-диапазоне частот усилители с выходной мощностью более 5 Вт в рабочей полосе частот более 25%, что соответствует удельной выходной мощности более 1 Вт на миллиметр ширины затвора. Проведено сравнение характеристик усилительных каскадов на транзисторах типа DpHEMT и DA-DpHEMT, изготовленных по одной технологии с одинаковой топологией, показавшее, что DA-DpHEMT с увеличением общей ширины затвора до 4,8 мм не теряет своих преимуществ перед DpHEMT по удельной выходной мощности, которая остается также в 1,5 выше, как и у транзистора с периферией 0,8 мм. Также автором проводится сравнение характеристик усилительных каскадов на новом типе

транзистора и на DрHEMT, изготовленном по более совершенной технологии, показавшие, что даже в таких неравных условиях DA-DрHEMT не уступает DрHEMT.

В заключении кратко отражены полученные результаты и сформулированы выводы из диссертационной работы.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации, а также раскрывает сущность и обоснованность научных положений выносимых на защиту.

Замечания и рекомендации

1. В диссертационной работе отмечается, что введение в гетероструктуру высоких потенциальных барьеров приводит к локализации горячих электронов в канале транзистора. Было бы полезно провести измерения гетероструктуры нового типа методом количественного анализа спектра подвижности (quantitative mobility spectrum analysis – QMSA), который дает возможность определить параметры различных групп электронов, имеющих разную подвижность и концентрацию. Это бы позволило напрямую подтвердить данное утверждение.

2. В работе не приведено описание псевдоморфной AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктуры без донорно-акцепторного легирования (состав и толщины слоев, степень легирования), а также не указана глубина квантовой ямы в ней, что не дает возможности для их детального сравнения.

3. В тексте диссертации явно не указано, что одним из преимуществ предложенной методики измерений дискретных полевых транзисторов является ее экономичность, т.к. для ее использования не требуется покупка современного дорогостоящего оборудования, которое обычно используется для построения и верификации модели.

4. В разделе 2.5. рассматриваются характеристики усилительных каскадов на основе транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием с делителями и сумматорами двух видов, однако не указано сколько таких каскадов было изготовлено.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа Маковецкой А.А. является самостоятельной законченной квалификационной научно-исследовательской работой, содержащей новые решения актуальной задачи совершенствования и применения СВЧ полевых транзисторов на псевдоморфных AlGaAs-InGaAs-Гетероструктурах. Проведенные Маковецкой А.А. исследования имеют существенное значение для развития теории СВЧ полупроводниковых приборов.

Высказанные замечания не снижают высокой оценки научной и практической значимости работы и не влияют на основные теоретические и

прикладные результаты диссертации. Актуальность работы, научная новизна и достоверность результатов, полученных Маковецкой А.А., не вызывают сомнений.

Диссертация имеет завершенный вид, оформлена в соответствии с нормативными требованиями, написана технически грамотным языком, имеет достаточное количество иллюстраций.

Результаты диссертации отражены в трудах автора, докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях высокого уровня.

Заключение

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Маковецкой А.А. «Исследование динамики горячих электронов в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием для разработки перспективных СВЧ усилителей мощности» полностью соответствует требованиям ВАК – п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Алёна Александровна Маковецкая достойна присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Официальный оппонент:
Старший научный сотрудник
ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, к.ф.-м.н.
141190 Россия, Московская обл., г. Фрязино,
пл. им. академика Б.А. Введенского, д. 1.
E-mail: vesizov@mail.ru
Тел.: 8(496) 565 24 60

Сизов В.Е. Сизов

Подпись Сизова Владимира Евгеньевича
Заверяю
Начальник отдела кадров
ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

О.Ю. Сизова

