

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук
Ильичёва Эдуарда Анатольевича, 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»

Диссертация Маковецкой Алёны Александровны посвящена комплексным исследованиям физико-технологических эффектов и процессов, мотивацией к проведению которых являются значимые физические и технологические проблемы, возникающих при разработках элементной базы твердотельной силовой сверхвысокочастотной электроники на основе твердых растворов GaAs-AlAs и GaN-AlN. Разработки эти широко востребованы в приборах и устройствах радиоэлектронных систем различного назначения (радиолокация, космическая связь, радиоэлектронная борьба, и др.). Наибольшие успехи в настоящее время здесь достигнуты с использованием сверхвысокочастотных полевых транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs с высокой подвижностью электронов и двухсторонним профилем легирования (DрHEMT). Несмотря на то, что удельная выходная мощность транзисторов на GaN в несколько раз выше соответствующего параметра GaAs транзисторов, существует ряд дополнительных физических и технологических проблем, мешающих добиться стабильных характеристик в серийных образцах. Особенно остро эта проблема стоит в России.

Поэтому, работа А. Маковецкой заключающаяся в исследовании и сравнительном анализе динамики физических процессов протекающих в DрHEMT на GaAlAs и GaAlN, в том числе на гетероструктурах нового типа (DA-DрHEMT), с последующим апробированием результатов исследований на конструкции мощного серийного транзистора АО "НПП "Исток" является безусловно актуальной и практически значимой.

Содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка цитируемой литературы. Содержание работы изложено на 172 страницах текста, иллюстрируется 73 рисунками и 9 таблицами, в списке цитируемой литературы 138 наименований.

Во введении определена область исследований, обоснована актуальность цели и сформулированных для ее реализации задач. В частности, обоснована необходимость определения частотных и температурных границ применения мощных полевых транзисторов нового

типа, а также необходимость создания оперативной методики построения нелинейной модели активного элемента и её практическая значимость.

В первой главе приведены результаты *сравнительных исследований особенностей динамики горячих электронов в полевых транзисторах на основе арсенидгаллиевых (DA-DpHEMT и DpHEMT) и нитридгаллиевых гетероструктур*, рассмотрены вопросы быстродействия полевых транзисторов выполненных на основе твердых растворов GaAlAs и GaAIN.

Теоретические исследования динамики поведения горячих электронов выполнены на основе квазидвумерной гидродинамической модели, а расчет энергетического спектра электронов в мультислойной гетероструктуре выполнен на основе совместного решения уравнений Шредингера и Пуассона.

С акцентом на субмикронные длины канала, автор уделил много внимания формированию средней дрейфовой скорости электронов под затвором. Было показано, что из-за более сильного всплеска дрейфовой скорости ее средняя величина под затвором прибора на основе GaAs при высоких величинах подвижности почти вдвое превосходит величину средней дрейфовой скорости в транзисторе на основе GaN, 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 энергиях оптических фононов. Проведенный анализ позволяет сделать заключение, что быстродействие GaN транзисторов при прочих равных условиях не превысит быстродействия полевых транзисторов на основе GaAs.

Выполняя сравнительные исследования динамики физических процессов протекающих в DpHEMT и в DA-DpHEMT (в транзисторах на гетероструктурах нового типа, автор показал что использование донорно-акцепторного δ - легирования приводит к увеличению плотности электронов в канале транзистора и к уменьшению интенсивности рассеяния носителей в канале транзистора, а следовательно и к возрастанию крутизны).

Таким образом, в главе 1 автором показано, что связанное с встраиванием δ - легированных барьеров акцепторного и донорного типов, приводят к увеличению предельной концентрации носителей тока в канале транзистора, "обострению" функции их распределения в нормальном оси канала направлении, что приводит к минимизации рассеяния и увеличению дрейфовой скорости. Уменьшается, также доля рассеяния носителей на оптических фонах в силу значимого увеличения глубины потенциальной ямы, расстояния между энергетическими уровнями в которой становятся большей энергии оптических фононов.

В первой главе диссертации Маковецкой А.А. также *проведен анализ физических механизмов, определяющих жесткую локализацию домена сильного поля и области интенсивного тепловыделения* у стокового края затвора гетероструктурных полевых транзисторов. Показано, что данный эффект, присущий традиционным гетероструктурным полевым

транзисторы, связан с поперечным пространственным переносом электронов между слоями гетероструктуры. Напротив, 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 до 20% снижает максимальный перегрев прибора относительно температуры корпуса.

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 УМ, связанные с конструкцией современного мощного полевого транзистора с большой шириной затвора и особенностями процесса сборки. Приведены результаты создания нелинейных моделей полевых транзисторов и проектирования на их основе мощных ВСТ и гибридных УМ Х-диапазона для передающих каналов АФАР.

Диссертантом проведены экспериментальные исследования DA-DрHEMT с шириной затвора от 0,4 до 5 мм и впервые показано, что при увеличении общей ширины затвора транзистора сохраняется преимущество DA-DрHEMT перед DrHEMT по удельной выходной мощности более чем в 1,5 раза. Это позволяет создавать в Х-диапазоне частот усилители с выходной мощностью более 5 Вт, что соответствует удельной выходной мощности более 1 Вт на миллиметр ширины затвора. Этот результат находится на уровне лучших мировых достижений в области разработки усилителей мощности на основе GaAs полевых транзисторов.

Автором впервые предложено использовать результаты измерений характеристик транзистора в согласующих импедансах для построения нелинейной модели мощных полевых транзисторов, тогда как во всем мире такого рода измерения используются лишь для проверки адекватности модели. Для реализации такого подхода Маковецкой А.А. была разработана тестовая плата, метод измерений и основанная на них методика построения нелинейной модели. Предложенный метод измерений S-параметров и максимальной выходной мощности дискретного транзистора, использующий согласующие микрополосковые схемы с регулируемым импедансом, позволил повысить точность построения нелинейных моделей мощных полевых транзисторов и создать на их основе несколько серийных усилителей мощности Х- и Ки-диапазона с характеристиками на уровне мировых аналогов.

В Заключении диссертации кратко обобщены основные результаты работы и сформулированы выводы и рекомендации.

В отношении недостатков работы можно сделать следующие замечания:

1. Нет информации о технологии формирования барьерных акцепторно-донарных δ -слоёв, что затрудняет понимание динамики поведения в них электронов в процессе изменений напряжения на затворе.
2. Нет информации о токах утечки по затвору для транзисторов архитектуры DA-DpHEMT; это представляется важным для оптимизации архитектуры гетероструктуры (она представлена в таб.1 на стр. 30), так как увеличению собственной крутизны ПТ за счет вариации толщины буферных слоев будет препятствовать вполне реальная возможность возникновения утечек по затвору по механизму Фаулера-Нордгейма.
3. Нет сравнительных данных о температурных диапазонах стабильной работы обсуждаемой ЭКБ на основе гетероструктурных полевых транзисторов, использующих традиционные и альтернативные конструкции на твердых растворах GaAlAs и GaAIN

Отмеченные недостатки не умаляют значимости полученных А. Маковецкой результатов. Они новы и оригинальны, достаточно полно представлены в периодической печати, и апробированы на научных конференциях. Выводы и положения, сформулированные в диссертации, основаны на теоретических расчетах по хорошо известным физическим моделям. Результаты численного моделирования и теоретического анализа проверены на основе большого объема экспериментальных данных, что делает достоверным выводы по исследованиям представленным в диссертации.

Научная значимость результатов диссертационной работы А. Маковецкой состоит в следующем:

1. Определены причины возрастания дрейфовой скорости электронов под затвором мощных полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием и показано, что введение в гетероструктуру δ -легированных потенциальных барьеров приводит в широкозонных полупроводниках к росту дрейфовой скорости электронов в $\sim 1,5$ раза, что позволяет применять их в миллиметровом диапазоне длин волн.
2. Показано, что в DA-DpHEMT реализуется такой режим работы, при котором специфика распределения области тепловыделения уменьшает до 20% тепловую нагрузку на прибор по сравнению с DpHEMT.

Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. На основе предложенной автором методики построения нелинейной модели разработан ряд мощных усилителей Х- и К-диапазона, применяемых в современных радиоэлектронных системах, таких как активные фазированные антенные решетки.

2. Автором показано, что транзисторы на основе гетероструктур с донорно-акцепторным легированием сохраняют свое преимущество по выходной мощности относительно псевдомофных транзисторов без донорно-акцепторного легирования, что позволяет создавать на их основе перспективные усилители мощности СВЧ диапазона.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа Маковецкой А.А. написана профессиональным языком. Проведенные автором исследования вносят значимый вклад в понимание физики работы мощных СВЧ полевых транзисторов, в практику их использования.

Название работы соответствует ее содержанию. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы отражены в 35 публикациях автора (из них 15 опубликованы в рецензируемых журналах ВАК), докладывались на 15 российских и международных конференциях высокого уровня.

Заключение

Диссертация А.А. Маковецкой является целостным и законченным исследованием, выполнена на высоком научно-техническом уровне и имеет большое прикладное значение. Она удовлетворяет всем требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а Алёна Александровна Маковецкая безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор НИУ МИЭТ
124498, г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, д. 1
e-mail: edil44@mail.ru
тел.: 89035941858

Э.А. Ильичёв

Подпись Эдуарда Анатольевича Ильичёва заверяю
Начальник отдела кадров НИУ МИЭТ



С. В. Заболотный