

На правах рукописи

Михайлович Сергей Викторович

**Частотные и шумовые параметры
наногетероструктурных полевых транзисторов
на основе AlGaN/GaN с разной толщиной
барьерного слоя**

05.27.01 — Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника,
приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

- Научный руководитель:** **Рыжий Виктор Иванович**
Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник ИСВЧПЭ РАН
- Научный консультант:** **Хабибуллин Рустам Анварович**
Кандидат физико-математических наук, учёный секретарь ИСВЧПЭ РАН
- Официальные оппоненты:** **Тергель Виктор Александрович**
Доктор физико-математических наук, профессор Института радиотехники и электроники им. Котельникова В.А. РАН
- Занавескин Максим Леонидович**
Кандидат физико-математических наук, начальник отдела прикладных нанотехнологий Курчатовского НБИКС-центра
- Ведущая организация:** Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2016 года на заседании диссертационного совета Д 002.204.01 при Физико-технологическом институте Российской академии наук по адресу: г. Москва, Нахимовский проспект д. 36 к. 1, 6 этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.204.01,
кандидат физико-математических наук



Вьюрков В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Существует большое многообразие применения радиоизлучения мм-диапазона длин волн. В частности, спутниковая связь (35, 60, 94 ГГц), беспроводная локальная сеть (60 ГГц), система передачи данных между двумя устройствами (70...80 ГГц), беспроводная линия для передачи телевизионного сигнала высокой чёткости (120 ГГц), сканер пассажиров в аэропорту и на вокзале (24...30 ГГц), автомобильный радиолокатор (77, 79 ГГц), радиоастрономия, дистанционный сбор данных об окружающей среде и т.д. Основными требованиями, предъявляемыми к монолитным интегральным схемам при решении этих задач, являются большая мощность, хорошая эффективность, высокая линейность, малый коэффициент шума, высокая степень интеграции, компактность, малая стоимость и высокая производительность.

GaN и тройные соединения на его основе обладают уникальными свойствами, такими как большая ширина запрещённой зоны, высокая скорость электронов и хорошая теплопроводность. Сильные спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации, присутствующие в нитриде галлия, способствуют образованию двумерного электронного газа (2DEG) вблизи гетерограницы AlGa_n/Ga_nN без введения легирующей примеси. Плотность 2DEG составляет примерно 10^{13} см⁻², что на порядок больше, чем в наногетероструктурах на основе GaAs и InP. Сочетание высокого пробивного напряжения, большой скорости электронов и высокой плотности 2DEG в канале, а также хорошей теплопроводности материала обеспечивает работу устройств в сверхвысокочастотной (СВЧ) области при больших напряжениях и высоких температурах, что даёт значительное преимущество по сравнению с другими материалами на основе соединений A₃B₅ и делает GaN ключевым материалом для СВЧ электроники.

Полупроводниковые приборы на основе широкозонных гетероструктур AlGa_n/Ga_nN за три десятилетия исследований и эксплуатации хорошо зарекомендовали себя в низкочастотной (до 10...15 ГГц) области. Использование GaN приборов в мм-диапазоне стало возможным благодаря прогрессивному развитию за последние девять лет технологий изготовления транзисторов. В

частности, было существенно снижено сопротивление омических контактов (до $0.026 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$) путём освоения повторного эпитаксиального выращивания высоколегированного контактного слоя n^+ -GaN. Была освоена самосовмещённая технология изготовления затвора и омических контактов, способствовавшая уменьшению сопротивления доступа до $0.1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$. А также была уменьшена длина затвора до 20 нм . По мере совершенствования технологий непрерывно происходило и увеличение максимальной частоты усиления по току f_T полевого транзистора. Однако после достижения значения 454 ГГц в 2013 году рост f_T остановился. Для анализа проделанного технологического прорыва ряд авторов предложили использовать метод, основанный на анализе времён задержек, но при этом не было дано объяснение прекращения роста f_T , чем оно обусловлено и где находится заложенный природой физический предел f_T в наногетероструктурных полевых транзисторах на основе AlGaN/GaN.

Немаловажной задачей является применение нитридных полевых транзисторов в малошумящих устройствах. Традиционно GaN применяется в первую очередь для создания усилителей мощности, и основная доля исследований была сосредоточена именно в этой области, а также в области изучения шума вида $1/f$ для характеристики качества выращенных наногетероструктур. Но, несмотря на это, существует относительно небольшое количество работ, посвящённых изучению высокочастотного шума. В этом плане полевые транзисторы мм-диапазона на основе GaN в первую очередь привлекают тем, что обладают высокими пробивным напряжением и линейностью, позволяющими исключить защитную цепь на входе малошумящего усилителя, которая используется для защиты усилителей на основе InP и GaAs от мощных электромагнитных импульсов, увеличивает коэффициент шума и уменьшает динамический диапазон. Таким образом можно упростить разработку схемы, увеличить надёжность, снизить массогабаритные параметры и стоимость изделия. А благодаря прорыву в исследованиях последних лет, применение GaN в малошумящих усилителях стало наиболее актуально, поскольку были достигнуты рекордные значения коэффициента шума 0.36 дБ на частоте 20 ГГц и 0.76 дБ на частоте 50 ГГц , что сопоставимо с коэффициентом шума полевых транзисторов на

основе арсенидных структур. Опубликованные работы по изучению высокочастотного коэффициента шума в GaN транзисторах в основном сводятся к демонстрации полученных экспериментальных данных с измерениями в диапазоне до 20 ГГц. Так, были показаны слабая зависимость коэффициента шума от мольной доли Al в барьерном слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, зависимость коэффициента шума от тока утечки по затвору, а также были опубликованы результаты измерений коэффициента шума при разных температурах. Но при этом для более высоких частот данные практически отсутствуют. Также не было исследований, показывающих зависимость коэффициента шума от толщины барьерного слоя и ёмкостной связи между затвором и стоком, которая может быть существенна в мм-диапазоне. Всё это требует более детального изучения.

Целью работы являлось установление взаимосвязи между высокочастотным коэффициентом шума наногетероструктурных полевых транзисторов мм-диапазона на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ от толщины барьерного слоя и ёмкости между затвором и стоком.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- ✓ Изготовлены образцы полевых транзисторов мм-диапазона на основе гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ с разной толщиной барьерного слоя и разными технологиями T-образных затворов и омических контактов.
- ✓ Проведены расчётно-аналитические исследования влияния толщины барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и длины T-образного затвора на минимальный коэффициент шума в мм-диапазоне длин волн.
- ✓ Разработан метод экстракции значений элементов шумовых моделей полевых транзисторов мм-диапазона на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ из измеренных S-параметров и коэффициента шума.
- ✓ Создана библиотека функций для ЭВМ, позволяющая производить экстракцию значений элементов малосигнальных шумовых моделей полевых транзисторов мм-диапазона на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ из измерений в диапазоне до 67 ГГц.

- ✓ Проведены измерения S-параметров и коэффициента шума серии образцов полевых транзисторов мм-диапазона с высокой подвижностью электронов на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$.
- ✓ Построены шумовые модели измеренных наногетероструктурных полевых транзисторов мм-диапазона на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$.

Научная новизна работы.

- ✓ Впервые проведено систематическое исследование влияния толщины барьерного слоя гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ с мольной долей Al от 22 до 32% и вставкой AlN на высокочастотный коэффициент шума полевых транзисторов мм-диапазона с высокой подвижностью электронов и длиной затвора менее 200 нм.
- ✓ Разработан метод экстракции значений элементов малосигнальной шумовой модели полевого транзистора мм-диапазона на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ из измерений СВЧ и шумовых параметров, основанный на прямых численных методах поиска экстремума целевой функции.
- ✓ Впервые для полевых транзисторов мм-диапазона на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ экспериментально обнаружена зависимость высокочастотного коэффициента шума от произведения квадрата максимальной частоты усиления по току на выходное сопротивление.
- ✓ Впервые экспериментально показана зависимость высокочастотного коэффициента шума в исследуемых полевых транзисторах мм-диапазона на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ от толщины барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$.
- ✓ Впервые экспериментально показано влияние ёмкостной связи между затвором и стоком на высокочастотный коэффициент шума в исследуемых полевых транзисторах мм-диапазона на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$.

Научная и практическая значимость.

Представленные результаты диссертационной работы расширяют знания о

зависимости частотных и шумовых характеристик полевых транзисторов мм-диапазона на основе гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ от толщины барьерного слоя и ёмкостной связи между затвором и стоком.

Практическая ценность полученных результатов связана с тем, что они важны для решения технологических задач по разработке новых, а также оптимизации и улучшению существующих приборов на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ гетероструктур с необходимыми параметрами.

Разработанный метод экстракции значений малосигнальных шумовых моделей полевых транзисторов мм-диапазона позволяет быстро и достаточно точно создавать шумовые модели для проектирования монолитных интегральных схем малощумящих усилителей для мм-диапазона длин волн.

Результаты работы были использованы при выполнении НИР «Разработка конструкторско-технологических решений создания МИС усилителей мощности на широкозонных полупроводниках для современной радиоаппаратуры в поддиапазоне частот 42–46 ГГц», соглашение о предоставлении субсидии от 06.11.2014 г. №14.604.21.0136, а также ОКР «Разработка комплекта бескорпусных монолитных интегральных схем 8-и миллиметрового диапазона длин волн», шифр «Многоцветник-45», гос. контракт № 14411.169999.11.076 от 06.03.2014 г. и ОКР «Разработка комплекта монолитных интегральных схем 5 мм диапазона длин волн», шифр «Многоцветник-22», гос. контракт № 13411.1400099.11.018 от 07.04.2013 г.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Установленная обратная зависимость высокочастотного коэффициента шума полевых транзисторов мм-диапазона на основе широкозонных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ с мольной долей Al от 22 до 32 % и вставкой AlN от произведения квадрата максимальной частоты усиления по току на выходное сопротивление.
2. Разработанный метод экстракции значений элементов малосигнальных шумовых моделей полевых транзисторов мм-диапазона с высокой подвижностью электронов на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ из измерений

сверхвысокочастотных и шумовых параметров, основанный на прямых численных алгоритмах поиска экстремума целевой функции.

3. Обнаруженные экспериментальные зависимости высокочастотного коэффициента шума полевых транзисторов мм-диапазона на основе широкозонных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ с длиной затвора менее 200 нм от толщины барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$ и ёмкости между затвором и стоком.

Личный вклад соискателя. Соискатель принимал участие во всех стадиях работы. Им был выполнен анализ литературных источников по теме диссертации, был разработан метод экстракции значений элементов шумовых моделей полевых транзисторов мм-диапазона, а также проведён анализ полученных экспериментальных и модельных данных. Он принимал непосредственное участие в процессе изготовления Т-образных затворов транзисторов, измерения S-параметров и коэффициента шума.

Достоверность результатов работы обусловлена применением современных экспериментальных методов изготовления транзисторов. При измерении S-параметров и коэффициента шума использовались современные и общепризнанные методики и оборудование. Полученные в работе результаты и выводы не противоречат ранее известным данным. Достоверность выводов следует из согласия экспериментальных данных с теоретическими расчётами и современными знаниями.

Апробация результатов. Результаты работы были представлены на следующих международных и российских конференциях: 10-th European Microwave Integrated Circuits Conference (Paris, 2015); 9-я, 10-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы» (Москва, 2013; Санкт-Петербург, 2015); XII научно-техническая конференция «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА» (Москва, 2013); Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC — 2011» (Москва, 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 5 статей опубликованы в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук, 7 работ — в прочих периодических изданиях и сборниках трудов всероссийских и международных конференций. Общий объём опубликованных по теме диссертации работ составил приблизительно 70 мп.стр.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 112-ти страницах и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, а также списка литературы, включающего 103 источника цитирования. Работа иллюстрирована 6-ю таблицами и 34-мя рисунками.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследования частотных и шумовых параметров полевых транзисторов на основе широкозонных гетероструктур AlGaN/GaN, сформулирована цель и решаемые задачи, описаны научная новизна и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приведён обзор литературы по созданию и характеристике полевых транзисторов мм-диапазона на основе AlGaN/GaN. В разделе 1.1 анализируется тенденция развития технологии создания полевых транзисторов. В частности, подчёркивается использование наиболее перспективных гетероструктур с барьерным слоем из чистого AlN толщиной порядка 25...50 Å, снижение сопротивления омических контактов до 0.026 Ом·мм путём освоения технологии повторного эпитаксиального выращивания высоколегированного контактного слоя n^+ -GaN, освоение самосовмещённой технологии изготовления затвора и омических контактов, способствовавшей уменьшению сопротивления доступа до 0.1 Ом·мм, и уменьшение длины затвора до 20 нм. Данное развитие привело к увеличению f_T до 454 ГГц и возможности использования полевых транзисторов на основе $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ в мм-диапазоне длин волн. В разделе 1.2 представлены подходы, используемые для описания высокочастотного шума

полевых транзисторов. Показано, как эти подходы применяются для описания шумовых параметров полевых транзисторов на основе AlGaN/GaN. Перечислены основные источники шума. Также продемонстрированы результаты измерений коэффициента шума, встречающиеся в литературе. В разделе 1.3 описаны методы экстракции значений элементов эквивалентной схемы полевого транзистора на основе AlGaN/GaN и спектральных плотностей источников шума. В выводах сформулированы основные вопросы, рассматриваемые в настоящей диссертационной работе.

В **Главе 2** представлены экспериментальные и теоретические методы исследования. В разделе 2.1 описано изготовление исследуемых полевых транзисторов мм-диапазона. Транзисторы изготавливались на основе гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ с прослойкой AlN, выращенных методом MOCVD (metal-organic chemical vapor deposition) в ЗАО «Элма-Малахит». Использовались серия гетероструктур с постепенно уменьшающейся толщиной барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$ от 33 до 11.2 нм, мольной долей $X_{\text{Al}} = 22...32\%$ и концентрацией 2DEG на уровне $1.11...1.30 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Основные параметры используемых гетероструктур продемонстрированы в таблице 1. В ходе изготовления

Таблица 1. Основные параметры гетероструктур.

№	Пластина	Толщина барьера $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$, нм (X_{Al} , %)	Подвижность электронов, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$	Концентрация электронов, 10^{13} см^{-2}
1	V-1909(5)	33 (22 %)	2055	1.11
2	V-1915(2)	18 (29 %)	2100	1.17
3	V-1910(5)	15.7 (31 %)	1880	1.28
4	V-1400(5)	15.3 (32 %)	1880	1.30
5	V-1654(2)	14.7(32 %)	1680	1.20
6	V-2099(1)	14.7 (31.5 %)	1830	1.14
7	V-2099(3)	14.7 (31.5 %)	1830	1.14
8	V-2235	14.7 (31 %)	1880	1.20
9	V-2236	14.7 (31 %)	1880	1.18
10	V-1911(5)	13.7 (31 %)	2300	1.28
11	V-1912(5)	11.2 (31 %)	2040	1.16

использовались три основных варианта технологических маршрутов (ТМ). По маршруту ТМ-1 изготавливались две пластины: V-1400(5) и V-1909(5). Маршрут состоял из следующих основных шагов: на гетероструктуре формировался слой мезоизоляция, затем к оставшимся на пластине активным областям производилось изготовление сплавных омических контактов. Затем поверхность пластин покрывалась слоем диэлектрика Si_3N_4 толщиной порядка 50 нм методом химического осаждения из газовой фазы в индуктивно связанной плазме (ICP-CVD). Далее в активной области между омическими контактами через маску электронного резиста производилось травление щелей в диэлектрике. Ширина щели для пластины V-1400(5) составляла 95...110 нм, а для пластины V-1909(5) — 195...210 нм. После чего производилось изготовление методом электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) затворов Шоттки длиной, соизмеримой с щелью в диэлектрике. Далее производилась общая пассивация слоем диэлектрика Si_3N_4 толщиной порядка 120 нм методом ICP-CVD. По маршруту ТМ-2 изготавливалась пластина V-1910(5). Основным отличием ТМ-2 от маршрута ТМ-1 являлось отсутствие операции пассивации поверхности пластины слоем диэлектрика перед формированием затворов Шоттки и, соответственно, отсутствие операции травления через резистивную маску щелей в диэлектрике. Отсутствие диэлектрического слоя под затвором должно снизить ёмкостную связь между затвором и стоком. По маршруту ТМ-3 изготавливались восемь пластин: V-1654(2), V-1911(5), V-1912(5), V-1915(2), V-2099(1), V-2099(3), V-2235 и V-2236. Основное отличие ТМ-3 от двух предыдущих маршрутов заключалось в изготовлении несплавных омических контактов к повторно выращенному высоколегированному слою n^+ -GaN. Слой n^+ -GaN выращивался методом молекулярно-лучевой эпитаксии на месте вытравленных через диэлектрическую маску областей гетероструктуры. Использование такой технологии должно снизить значение контактного сопротивления, что и наблюдалось экспериментально. Помимо этого в ТМ-3, так же как и в ТМ-2, отсутствует операция пассивации поверхности пластины слоем диэлектрика перед формированием затворов Шоттки и соответствующая операция травления щелей в диэлектрике.

В разделе 2.2 описаны методы измерения параметров транзисторов: мето-

дика измерения омического и слоевого сопротивлений, методика измерения S -параметров, методика измерения коэффициента шума и соответствующие процедуры калибровки измерительного оборудования.

В разделе 2.3 описан разработанный метод экстракции значений элементов малосигнальной эквивалентной схемы полевого транзистора мм-диапазона, представленной на рисунке 1. Значения элементов подбирались численным методом на основе произведённых измерений. Для этого из элементов схемы был составлен вектор, определённый в 19-мерном евклидовом пространстве, и при помощи алгоритмов Нелдера-Мида и Хука-Дживса производился поиск минимального значения целевой функции на множестве допустимых решений, которое ограничивалось 19-мерным прямоугольником. Целевая функция вычислялась по формуле $F_t = \Delta_S + \Delta_K + 0.0025 \cdot \Delta_U$,

$$\Delta_S = \frac{1}{4} \sum_{i,j=1}^2 |S_{ij} - S_{ij}^{\text{изм}}|^2, \quad \Delta_K = (K - K_{\text{изм}})^2, \quad \Delta_U = \frac{(U - U_{\text{изм}})^2}{U_{\text{изм}}^2},$$

где S , K и U — рассчитанные с помощью линейной модели, представленной на рисунке 1, S -параметры, коэффициент устойчивости и коэффициент однонаправленного усиления, а $S^{\text{изм}}$, $K_{\text{изм}}$ и $U_{\text{изм}}$ — соответствующие измеренные ве-

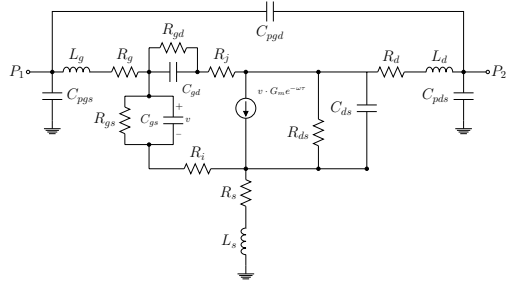


Рис. 1. Полная малосигнальная эквивалентная схема полевого транзистора мм-диапазона, включённого по схеме с общим истоком. Схема состоит из следующих элементов: G_m — внутренняя крутизна; τ — постоянная времени задержки; C_{gs} , C_{gd} , C_{ds} — ёмкости затвор-исток, затвор-сток и сток-исток; v — разность потенциалов на ёмкости C_{gs} ; R_i , R_j — сопротивления области канала под затвором со стороны истока и стока соответственно; R_{ds} — выходное сопротивление; R_s , R_d , R_g — сопротивления стока, истока и сопротивление металла затвора; C_{pgs} , C_{pds} , C_{pgd} — ёмкости металлических площадок транзистора со стороны затвора, стока и ёмкость между затвором и стоком; L_g , L_d , L_s — индуктивности затвора, стока и истока.

личины. Значения Δ_S и Δ_U усреднялись по количеству измеренных точек от 0.1 до 67 ГГц с шагом 0.1 ГГц, а Δ_K — по всем точкам от 0.1 до 10 ГГц с шагом 0.1 ГГц. Поскольку целевая функция имеет несколько локальных минимумов и глубокие овраги, что может повлиять на значения определяемых параметров и скорость сходимости решения, то было дополнительно ограничено множество допустимых решений и выбрано начальное приближение значений элементов G_m , R_{ds} , R_s и R_d следующим образом. Элементы R_s и R_d моделируют сопротивления омических контактов истока и стока, а также части канала до затвора. Их значение не должно превосходить максимально возможного, определяемого суммой $R = R_{sh} \cdot d + 2 \cdot R_{ohm}$, где d — расстояние между стоком и истоком. Значения внешних крутизны g_m и выходной проводимости g_{ds} определялись из действительных значений динамических комплексных проводимостей $\Re(Y_{21})$ и $\Re(Y_{22})$ при частоте, стремящейся к нулю. Значения внутренних крутизны G_m и выходной проводимости G_{ds} оценивались из соотношений:

$$G_m = \frac{g_m}{1 - g_m \cdot R_s - g_{ds} \cdot (R_s + R_d)}, \quad G_{ds} = \frac{g_{ds}}{1 - g_m \cdot R_s - g_{ds} \cdot (R_s + R_d)},$$

где $G_{ds} = 1/R_{ds}$. Также из этих соотношений следуют дополнительные ограничения $0 \leq g_m \cdot R_s \leq 0.5$ и $0 \leq g_{ds} \cdot (R_s + R_d) \leq 0.2$. Как показывает практика, этих приближений достаточно для быстрого и точного определения значений элементов эквивалентной схемы полевого транзистора.

В разделе 2.4 описан метод экстракции параметров источников высокочастотного шума, основанный на преобразованиях матриц спектральных плотностей. В методе полевой транзистор математически разделялся на две части: внутреннюю и внешнюю. Внешняя часть моделировалась восьмиполусной матрицей проводимости и включала источники теплового шума, спектральная плотность которых, по теореме Найквиста, определялась сопротивлениями затвора, стока и истока. Далее, зная матрицы проводимости и спектральной плотности флуктуаций токов полного транзистора и внешней его части, вычислялись матрицы проводимости и спектральной плотности внутренней части транзистора. В модели внутренней части полевого транзистора присутствуют три некоррелируемых источника высокочастотного шума. Первый источник связан со случайными колебаниями дрейфовой скорости электронов двумерного элек-

тронного газа в канале транзистора. От него зависит спектральная плотность флуктуаций тока со стороны стока. Второй источник связан с наведёнными случайными колебаниями напряжения на затворе. Спектральная плотность этого источника через ёмкость между затвором и истоком связана со спектральной плотностью колебания тока со стороны затвора, делая её пропорциональной квадрату частоты. Также этот источник определяет взаимную спектральную плотность, модуль которой пропорционален рабочей частоте, и через крутизну связан со спектральной плотностью колебаний тока со стороны стока, которая не зависит от частоты. Третий источник обусловлен током утечки через потенциальный барьер затвора. Эти три источника определяются по зависимостям от частоты спектральных плотностей флуктуаций тока со стороны затвора и стока внутренней части транзистора.

Глава 3 посвящена теоретическому анализу. В [разделе 3.1](#) анализируется зависимость высокочастотного коэффициента шума от толщины барьерного слоя AlGaIn и длины затвора. При анализе использовался метод, основанный на матричных преобразованиях спектральных плотностей флуктуаций токов. Основываясь на этих преобразованиях, минимальный коэффициент шума полевого транзистора вычисляется при помощи следующего равенства:

$$F_{min} = 1 + 2 \left(R_n G_{cor} + \sqrt{R_n G_n + (R_n G_{cor})^2} \right),$$

где R_n — эквивалентное шумовое сопротивление, G_n — эквивалентная шумовая проводимость, G_{cor} — действительная часть комплексной корреляционной проводимости Y_{cor} . Для дальнейшего анализа данное равенство было выражено через два безразмерных параметра $X = R_n G_{cor}$ и $\gamma = G_n / G_{cor}$ и записано следующим образом:

$$F_{min} = 1 + 2 \left(X + \sqrt{X^2 + \gamma X} \right). \quad (1)$$

Три основных шумовых параметра G_n , R_n и $Y_{cor} = G_{cor} + jB_{cor}$ в теории матричного описания определяются через полные комплексные проводимости и спектральные плотности случайных флуктуаций токов, нормированные на

$4k_B T_0$, где $T_0 = 290$ К — опорная температура. Согласно такому определению

$$X = \frac{S_{\delta i_2, \delta i_2}}{|Y_{21}|^2} \cdot \Re \left(Y_{11} - Y_{21} \cdot \frac{S_{\delta i_1, \delta i_2}}{S_{\delta i_2, \delta i_2}} \right), \quad \gamma = \frac{S_{\delta i_1, \delta i_1} S_{\delta i_2, \delta i_2} - |S_{\delta i_1, \delta i_2}|^2}{\Re(Y_{11} S_{\delta i_2, \delta i_2} - Y_{21} S_{\delta i_1, \delta i_2})}.$$

Исходя из этого определения можно получить характер зависимости минимального коэффициента шума полевого транзистора мм-диапазона на нитриде галлия от максимальной частоты усиления по току f_T и выходного сопротивления R_{ds} . Для этого необходимо лишь определить с учётом нижеизложенных допущений зависимости X и γ . При получении характера зависимости считалось, что спектральная плотность случайных флуктуаций тока со стороны стока $S_{\delta i_2, \delta i_2}$ в основном обусловлена флуктуациями тока в канале транзистора из-за флуктуаций дрейфовой скорости электронов двумерного электронного газа, и, для горячих электронов, эта спектральная плотность в нелинейной области пропорциональна производной тока по напряжению, то есть выходной проводимости. Коэффициент усиления по току $|H_{21}|$ с хорошей точностью равен отношению максимальной частоты усиления по току f_T к рабочей частоте транзистора f в широком диапазоне частот. Действительная часть от обратного значения входной комплексной проводимости Y_{11} равна входному сопротивлению, которое в основном определяется сопротивлением затвора. Взаимная спектральная плотность случайных флуктуаций токов со стороны затвора и стока полевого транзистора $S_{\delta i_1, \delta i_2}$ была определена как тройное произведение входной комплексной проводимости на комплексное значение крутизны, учитывающее фазовую задержку сигнала на стоке относительно затвора, и на спектральную плотность случайных флуктуаций напряжения на затворе $S_{\delta i_1, \delta i_2} = Y_{11} Y_{21}^* S_{\delta v_g, \delta v_g}$. Отсюда получаем, что

$$X \approx A \cdot \frac{1}{f_T^2 R_{ds}} - B, \quad (2)$$

где A и B — два не зависящих от f_T и R_{ds} параметра, определяемые из экспериментальных данных. Для аналогичных рассуждений было получено, что $\gamma = const \approx 1$, а коэффициент шума определяется только через X . Выразив, согласно (1), X через F_{min} и приравняв к (2), была получена линейная зависимость

$$\frac{(F_{min} - 1)^2}{4 \cdot F_{min}} = A \cdot \frac{1}{f_T^2 R_{ds}} - B. \quad (3)$$

Полученное выражение должно выполняться при условии превосходства спектральной плотности флуктуаций тока, связанных с колебаниями дрейфовой скорости двумерных электронов в канале, над другими механизмами флуктуаций. Точно вычислить значения X и γ можно только на основе упрощённой эквивалентной схемы транзистора. Наиболее подходящей для этой цели является шумовая модель Поспешальского, в которой учитывается только внутренняя часть транзистора без ёмкостной связи между затвором и стоком. Для этой модели выполняются равенства

$$X = \left(\frac{\omega C_{gs}}{G_m} \right)^2 \frac{R_i T_d}{R_{ds} T_0} = \left(\frac{f}{f_C} \right)^2 \frac{R_i T_d}{R_{ds} T_0}, \quad \gamma = \frac{T_g}{T_0} \approx 1. \quad (4)$$

Для того чтобы теоретически увидеть зависимость минимального коэффициента шума полевого транзистора мм-диапазона на нитриде галлия от толщины барьерного слоя гетероструктуры и длины Т-образного затвора, были использованы результаты крупной экспериментальной работы (IEEE Trans. Electron Devices. 2007. V.54. P.2589–2597), в которой авторы на основе обработки многочисленных данных установили эмпирическую зависимость между максимальной частотой усиления по току f_T , длиной затвора L_G и толщиной барьера гетероструктуры $t_{бар}$. Там же была показана экспериментальная зависимость выходного сопротивления R_{ds} от аспектного отношения $L_G/t_{бар}$. Частота отсечки f_T и аппроксимированное выражение для R_{ds} выглядят следующим образом:

$$f_T [\text{ГГц}] = \frac{19.8}{L_G [\text{мкм}] + 5.1 \cdot t_{бар}}, \quad R_{ds} [\text{Ом}] = 65 \cdot 10^{0.065 \cdot L_G/t_{бар}}. \quad (5)$$

При помощи подстановки экспериментальных соотношений (5) в выражения (1) и (4) была проанализирована зависимость коэффициента шума от толщины барьерного слоя гетероструктуры и длины затвора на частоте 35 ГГц. Оказалось, что при фиксированной толщине барьерного слоя значения коэффициента шума для диапазона длин затворов от 60 до 250 нм локализованы в определённой области (рисунок 2), и при уменьшении барьера эта область перемещается в сторону уменьшения коэффициента шума. Такая локализация обусловлена конкуренцией двух параметров f_T и R_{ds} , поскольку они входят в знаменатель X в виде произведения $f_T^2 R_{ds}$. При уменьшении длины затвора

f_T растёт, но при этом выходное сопротивление уменьшается, и наоборот, при увеличении длины затвора выходное сопротивление увеличивается, но при этом f_T уменьшается. В случае уменьшения толщины барьера увеличиваются одновременно оба параметра, максимальная частота усиления по току и выходное сопротивление. Таким образом, на основании обработки эмпирических данных было установлено, что уменьшение толщины барьерного слоя приводит к монотонному возрастанию произведения $f_T^2 R_{ds}$ и уменьшению коэффициента шума.

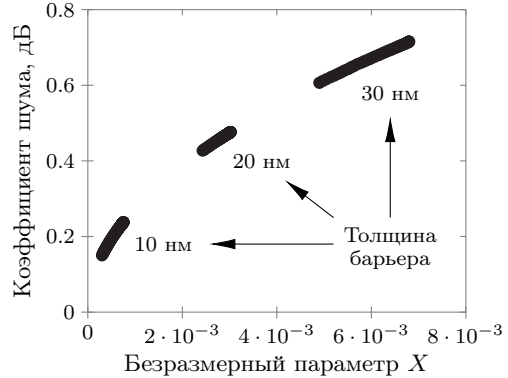


Рис. 2. Расчитанная зависимость коэффициента шума на частоте 35 ГГц от безразмерного параметра X для внутренней части полевого транзистора.

В разделе 3.2 производится теоретический анализ частотных параметров полевых транзисторов мм-диапазона на основе GaN. Частота отсечки f_T в основном определяется суммарным временем перезарядки внутренних и внешних ёмкостей, и для повышения быстродействия необходимо уменьшать эти ёмкости, а также паразитные сопротивления. Если устремить сопротивления и длину затвора к нулю (технологический предел), то можно получить величину

$$f_T = 8.85 \cdot 10^{-8} \frac{v_e}{2\pi} \cdot \frac{\epsilon_{бар}}{C_{gd} \cdot t_{бар}},$$

которая будет определяться дрейфовой скоростью электронов, толщиной барьерного слоя и ёмкостной связью между затвором и стоком.

В Главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований и сравнение с теоретическим анализом. В разделе 4.1 приведены основные статические и динамические параметры изготовленных полевых транзисторов. В разделе 4.2 рассматривается влияние максимальной частоты усиления по току и выходного сопротивления на коэффициент шума. Согласно теоретическому

анализу, в случае превосходства флуктуаций тока со стороны стока, связанных с колебаниями дрейфовой скорости электронов в канале гетероструктуры, должно выполняться равенство (3). При этом значение коэффициента шума будет в основном определяться произведением квадрата максимальной частоты усиления по току на выходное сопротивление. Как продемонстрировано на рисунке 3, подобная зависимость действительно наблюдалась на эксперименте. Следовательно, для полевых транзисторов мм-диапазона на нитриде галлия с длиной затвора менее 200 нм минимальный коэффициент шума определяется не только частотой отсечки f_T , но также становится существенным учёт выходной проводимости, которая возрастает при уменьшении аспектного отношения длины затвора к толщине барьерного слоя. Более наглядно это видно при сравнении транзисторов с наибольшим f_T и наименьшим NF_{min} . Самые высокочастотные транзисторы были изготовлены на пластине V-1911(5) с толщиной барьерного слоя 13.7 нм и имели длину затвора 90 нм, крутизну 500 мС/мм, выходную проводимость 45.5 мС/мм, $f_T/f_{MAX} = 102/177$ ГГц и $NF_{min} = 1.7$ дБ на частоте 35 ГГц. Самые маломушмящие транзисторы были изготовлены на пластине V-1912(5) с толщиной барьерного слоя 11.2 нм и имели длину затвора 125 нм, крутизну 450 мС/мм, выходную проводимость 18.5 мС/мм, $f_T/f_{MAX} = 90/200$ ГГц и $NF_{min} = 1.0$ дБ на частоте 35 ГГц. Видно, что у транзисторов с коротким (90 нм) затвором f_T больше на 10 ГГц, при этом коэффициент шума также больше на 0.7 дБ из-за высокого значения выходной проводимости.

В разделе 4.3 анализируется влияние толщины барьерного слоя на коэф-

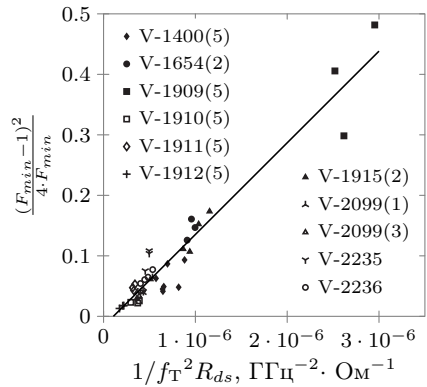


Рис. 3. Зависимость безразмерного параметра X , выраженного через минимальное значение коэффициента шума F_{min} , от обратного произведения квадрата максимальной частоты усиления по току на выходное сопротивление.

коэффициент шума. Теоретические оценки показывают, что для внутренней части полевого транзистора при фиксированной толщине барьерного слоя и вариациях длины затвора значения коэффициента шума локализованы в определённой области, которая при уменьшении толщины барьерного слоя перемещается в сторону уменьшения шума. При этом, поскольку основным источником высокочастотного шума являются флуктуации дрейфовой скорости двумерных электронов в канале полевого транзистора, то для полного транзистора со всеми внешними «паразитными» элементами и источниками теплового шума от сопротивлений металла затвора и омических контактов стока и истока также должно наблюдаться уменьшение коэффициента шума, и, как продемонстрировано на рисунке 4, подобная зависимость действительно наблюдается на эксперименте. Видно, что при уменьшении толщины барьера $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ от 33 до 11.2 нм значения минимального коэффициента шума сосредоточены вблизи кривой, описываемой формулой (3) с учётом линейной аппроксимации данных, представленных на рисунке 3, и монотонно уменьшаются вдоль этой кривой от 5 до 1 дБ. На графике также показано значение для полевого транзистора с толщиной барьерного слоя 6 нм, взятое из литературного источника, что свидетельствует о сохранении тенденции при уменьшении толщины барьера менее 11.2 нм. Явная зависимость коэффициента шума на частоте 35 ГГц от толщины барьера продемонстрирована на рисунке 5. Там же для сравнения показаны значения, взятые из литературных источников.

В разделе 4.4 анализируется ёмкостная связь между затвором и стоком. В ранних теоретических работах при анализе шумовых параметров и выводе аналитических выражений для коэффициента шума полевого транзистора считали, что эта ёмкость мала, и пренебрегали её влиянием на расчёты. Однако в полевых транзисторах мм-диапазона с длиной затвора менее 200 нм влияние ёмкостной связи между затвором и стоком становится существенным, особенно на частотах более 30 ГГц. На рисунке 6 показана зависимость минимального коэффициента шума на частоте 35 ГГц от ёмкости затвор-сток. Видно, что при уменьшении ёмкостной связи коэффициент шума уменьшается. Для транзисторов, изготовленных по маршруту ТМ-1, в котором нижняя часть затвора

«ножка» формировалась через предварительно вытравленную щель в диэлектрической плёнке (пластина V-1400(5)), ёмкость составляет порядка 20...22 фФ, при этом коэффициент шума достигает значения порядка 1.8 дБ, а для транзисторов, изготовленных по маршруту ТМ-3 (пластина V-1912(5)) без покрытия поверхности пластины слоем диэлектрика перед изготовлением затворов, ёмкость составляет 12 фФ, а коэффициент шума достигает значения менее 1 дБ. Однако стоит отметить, что не всегда уменьшение ёмкостной связи между затвором и стоком приводит к уменьшению коэффициента шума, как, например, для пластин V-1654(2) и V-2099(1). Это лишний раз подчёркивает, что коэффициент шума весьма нетривиально зависит от многих параметров. То есть изменение одного из них может не повлиять на изменение коэффициента шума. Тем не менее можно с уверенностью сказать, что для меньшей ёмкости затвор-сток можно, при определённых условиях, получить меньший коэффициент шума.

Уменьшение значения ёмкостной связи между затвором и стоком является весьма сложной технологической задачей, поскольку эта ёмкость определяется геометрией Т-образного затвора, а также толщиной и составом диэлектрической плёнки вокруг него. Такая геометрия способствует одновременному уменьшению как длины затвора, так и его сопротивления. Наименьшими значениями ёмкостей обладали затворы, изготовленные в рамках технологического маршрута ТМ-3 без слоя диэлектрика. Нижняя часть затвора «ножка» формировалась при помощи резистивной маски, а её высота определялась толщиной нижних слоёв резиста. Уменьшение высоты «ножки» при неизменной ширине верхней части затвора «шляпки» приводит к увеличению ёмкостной связи между затвором и стоком. Толщина нижних слоёв резистивной маски в основном зависит от времени обработки в кислородной плазме перед напылением металла затвора и уменьшается по мере его увеличения. Минимальное значение ёмкости порядка 11...12 фФ при ширине «шляпки» 600 нм соответствует 60-секундной обработке. Ёмкость можно уменьшить при уменьшении ширины «шляпки» до 400 нм, однако из-за особенностей технологического оборудования, в частности геометрии напыления металла, сделать ширину «шляпки» менее 600 нм по всей поверхности пластины весьма проблематично.

Рис. 4. Зависимость коэффициента шума от обратного произведения квадрата максимальной частоты усиления по току на выходное сопротивление полевых транзисторов на частоте 35 ГГц. Точки — экспериментальные данные, линия — значения, вычисленные по формуле (3) с учётом линейной аппроксимации данных (рисунок 3). На графике также указана толщина барьерного слоя.

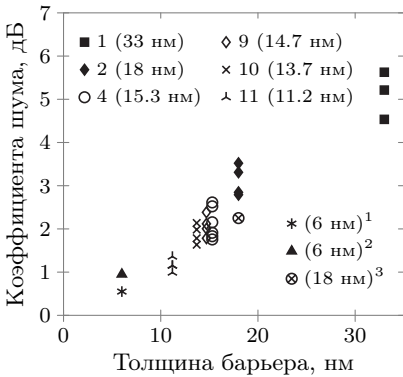
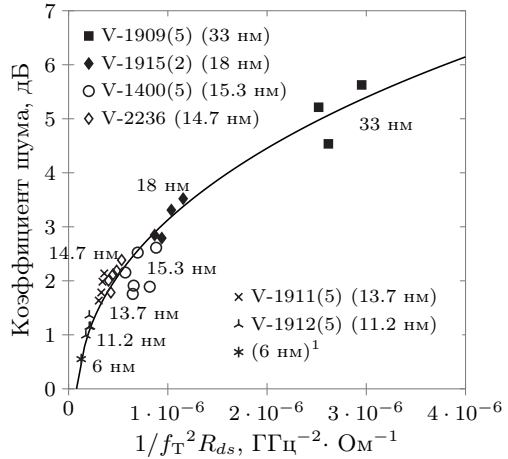


Рис. 5. Зависимость коэффициента шума от толщины барьерного слоя. Номера гетероструктур соответствуют таблице 1. На графике также продемонстрированы значения из литературных источников.

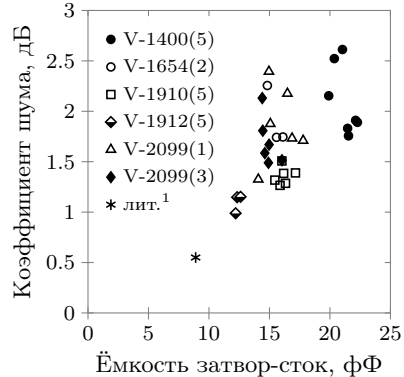


Рис. 6. Зависимость коэффициента шума полевых транзисторов от ёмкости между затвором и стоком на частоте 35 ГГц. На графике также продемонстрировано значение из литературного источника.

¹IEEE Trans. Electron Devices. 2013. V.60. P.2982–2996.

²IEEE Electron Device Letters. 2012. V.33. P.1258–1260.

³IEEE Electron Device Letters. 2010. V.31. P.105–107.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе изучено влияние толщины барьерного слоя широкозонных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$, а также ёмкостной связи между затвором и стоком на высокочастотный коэффициент шума полевых транзисторов мм-диапазона с высокой подвижностью электронов. Исследовались транзисторы с длиной затвора менее 200 нм, изготовленные на основе гетероструктур с мольной долей Al от 22 до 32 % и прослойкой AlN. Измерялись сопротивления омических контактов, S-параметры и коэффициент шума при температуре 300 К. Длины затворов оценивались на основе фотографий, сделанных в растровом электронном микроскопе.
2. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что высокочастотный коэффициент шума полевого транзистора мм-диапазона с высокой подвижностью электронов на основе широкозонных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ и длиной затвора менее 200 нм обратно пропорционален произведению квадрата максимальной частоты усиления по току на выходное сопротивление, что обусловлено превосходством спектральной плотности флуктуаций тока, связанной со случайными флуктуациями дрейфовой скорости горячих электронов в канале полевого транзистора, над другими механизмами флуктуаций.
3. Показано, что уменьшение толщины барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$, а также уменьшение ёмкостной связи между затвором и стоком приводят к уменьшению высокочастотного коэффициента шума.
4. Разработан метод экстракции значений элементов малосигнальной модели и спектральных плотностей источников шума полевого транзистора мм-диапазона на основе широкозонных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$. Метод основан на прямых численных алгоритмах поиска экстремума целевой функции и позволяет быстро и достаточно точно создавать шумовые модели на основе измерений частотных и шумовых параметров.
5. Изготовлены полевые транзисторы мм-диапазона на основе широкозонной гетероструктуры $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ с толщиной барьерно-

го слоя 11.2 нм и длиной затвора 125 нм. Транзисторы имеют значения $f_T = 90$ ГГц, $f_{\text{MAX}} = 200$ ГГц, а достигнутое значение минимального коэффициента шума составляет 1 дБ на частоте 35 ГГц, что по коэффициенту шума сопоставимо с полевыми транзисторами на арсенидных структурах.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. С.В. Михайлович, Ю.В. Фёдоров. Влияние толщины барьерного слоя наногетероструктур и ёмкости затвор-сток на сверхвысокочастотные и шумовые параметры полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов на AlGaIn/GaN // Известия вузов. Радиофизика. — 2016. — Т.59. — № 2. — С.171–179.

2. Ю.В. Фёдоров, С.В. Михайлович. Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные // Нано- и микросистемная техника. — 2016. — № 4. — С.217–226.

3. Yu.V. Fedorov, S.V. Mikhaylovich. Effect of Heterostructure Parameters and Fabrication Technology on the Noise Properties of AlGaIn/GaN HEMT // Proceedings of the 10th European Microwave Integrated Circuits Conference. — IEEE, 2015. — P.144–147.

4. Р.Р. Галиев, Д.Л. Гнатюк, А.В. Зуев, Д.В. Крапухин, М.В. Майтама, О.С. Матвеевко, С.В. Михайлович, Ю.В. Фёдоров, М.Ю. Щербакова. Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн // Нано- и микросистемная техника. — 2015. — № 2. — С.21–32.

5. Ю.В. Фёдоров, С.В. Михайлович. Анализ конструктивно-технологических требований к разработке усилителей мощности на нитридных гетероструктурах // Материалы 10-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы». — СПб: Изд-во СПбГПУ, 2015. — С.163–164.

6. Ю.В. Фёдоров, С.В. Михайлович. Влияние параметров наногетероструктур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaIn/GaN HEMT // Нано- и микросистемная техника. — 2014. — № 10. — С.12–17.

7. П.П. Мальцев, Ю.В. Федоров, Р.Р. Галиев, С.В. Михайлович, Д.Л. Гна-

тюд. Нитридные приборы миллиметрового диапазона // Наноиндустрия. — 2014. — № 3. — С.40–51.

8. Ю.В. Фёдоров, С.В. Михайлович, Р.Р. Галиев, М.Ю. Щербакова. Анализ влияния толщины барьерного слоя и технологии изготовления на шумовые параметры НЕМТ AlGaN/GaN в Ка-диапазоне частот // Материалы XII научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». — М: ОАО «НПП «Пульсар», 2013. — С.49–52.

9. С.В. Михайлович, О.С. Матвеев, Ю.В. Фёдоров. Исследование зависимости коэффициента шума AlGaN/GaN НЕМТ в Ка-диапазоне частот от толщины барьера AlGaN // Материалы 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы». — СПб: Изд-во СПбГПУ, 2013. — С.207–208.

10. С.В. Михайлович. Метод построения масштабируемой шумовой модели гетероструктурного полевого транзистора миллиметрового диапазона длин волн // Оборонная техника. — 2012. — № 1. — С.34–37.

11. С.В. Михайлович, Ю.В. Фёдоров, А.С. Бугаев, Р.Р. Галиев, А.Э. Ячменёв, М.Ю. Щербакова. Построение масштабируемой шумовой модели МНЕМТ на GaAs с Lg от 50 до 250 нм // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2011. — Т.2. — № 2. — Ч.2. — С.31–35.

12. С.В. Михайлович, Ю.В. Фёдоров, Р.Р. Галиев, М.Ю. Щербакова. Метод построения масштабируемой шумовой малосигнальной эквивалентной схемы гетероструктурного полевого транзистора миллиметрового диапазона длин волн // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC — 2011», 14–17 ноября 2011 г., Москва. / Под ред. чл.-корр. РАН А.С. Сигова. — М.: Энергоатомиздат, 2011. — Т.11. — № 1. — С.182–185.