

**Выписка из протокола № 5 заседания Ученого совета
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской академии наук**

05 мая 2016 г.

Присутствовали:

доктора наук: В.И. Рыжий, Г.Б. Галиев, П.П. Мальцев, А.Н. Алешин,
С.А. Гамкрелидзе

кандидаты наук: Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, А.Ю. Павлов,
О.С. Матвеев, Д.Л. Гнатюк.

Всего: 10 человек из 11 членов Совета. Кворум имеется.

Председатель:

Научный руководитель ИСВЧПЭ РАН, д.т.н., профессор П.П. Мальцев

Ученый секретарь:

к.ф.-м.н. Р.А. Хабибуллин

СЛУШАЛИ: Доклад по диссертационной работе Михайловича Сергея Викторовича «Частотные и шумовые параметры наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaIn/GaN с разной толщиной барьерного слоя», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

В ходе обсуждения д.ф.-м.н., член-корреспондент Российской академии наук, профессор В.И. Рыжий, являющийся научным руководителем С.В. Михайловича, сообщил, что во время работы над диссертацией соискатель проявил себя как специалист, владеющий глубокими теоретическими знаниями и необходимым практическим опытом. С.В. Михайлович выполнил поставленные перед ним задачи самостоятельно. Опубликованные

соискателем работы достаточно полно отражают содержание диссертации. По мнению В.И. Рыжия работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и её следует рекомендовать к защите в Физико-технологическом институте РАН.

Учёный секретарь ИСВЧПЭ РАН, научный консультант диссертанта, к.ф.-м.н. Р.А. Хабибуллин в своём выступлении указал на актуальность выполненной работы и практическую значимость проведённых исследований влияния толщины барьерного слоя гетероструктур AlGaIn/GaN и ёмкостной связи между затвором и стоком на высокочастотный коэффициент шума, а также предложенного метода построения линейных шумовых моделей полевых транзисторов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN.

С положительной оценкой работы также выступили:

- зав. лабораторией исследования процессов формирования низко-размерных электронных систем в наногетероструктурах соединений A3B5, д.ф.-м.н. Г.Б. Галиев;
- зав. лабораторией фундаментальных исследований низко-размерных электронных систем в наногетероструктурах полупроводниковых соединений A3B5, д.ф.-м.н. А.Н. Алёшин.

ПОСТАНОВИЛИ: рекомендовать диссертацию Михайловича Сергея Викторовича «Частотные и шумовые параметры наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaIn/GaN с разной толщиной барьерного слоя» к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 «Твёрдотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» и утвердить заключение, содержащее общую характеристику диссертационной работы.

Актуальность темы

На сегодняшний день существует большое многообразие применения радиоизлучения мм-диапазона длин волн. Основными требованиями, предъявляемыми к монолитным интегральным схемам при решении поставленных задач, являются большая мощность, малый коэффициент шума, высокая степень интеграции, малая стоимость и высокая производительность. Широкозонные гетероструктуры на основе GaN благодаря сочетанию высокого пробивного напряжения, большой скорости электронов и высокой плотности двумерного электронного газа в канале обеспечивают работу устройств в сверхвысокочастотной (СВЧ) области, при больших напряжениях и высоких температурах, что даёт значительное преимущество по сравнению с другими материалами на основе соединений A_3B_5 и делает GaN ключевым материалом для современной СВЧ электроники.

Полупроводниковые приборы на основе AlGaIn/GaN хорошо зарекомендовали себя в низкочастотной (до 10...15 ГГц) области. Традиционно эти гетероструктуры применялись в первую очередь для создания усилителей мощности. Тем не менее благодаря развитию за последние годы технологий стало возможным использование GaN в приборах мм-диапазона и особенно в малошумящих усилителях. В этом плане полевые транзисторы на основе GaN в первую очередь привлекают тем, что обладают высокими пробивным напряжением и линейностью, позволяющими исключить защитную цепь на входе малошумящего усилителя мм-диапазона, 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.

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. При этом 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.

Настоящая работа посвящена изучению влияния толщины барьерного слоя широкозонных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ и ёмкости между затвором и стоком на высокочастотный коэффициент шума наногетероструктурных полевых транзисторов мм-диапазона на их основе.

Научная новизна и достоверность полученных результатов

Научная новизна работы состоит в следующих результатах:

- 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 локального 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 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$.

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, неоднократно апробированы на Международных и российских конференциях и научных семинарах. Достоверность выводов следует из согласия экспериментальных данных с теоретическими расчётами и современными знаниями.

Положения, выносимые на защиту

- 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 максимальной частоты усиления по току на выходное сопротивление.
- 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.

- 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.

Научная и практическая значимость работы

Представленные результаты диссертационной работы расширяют знания о зависимости частотных и шумовых характеристик полевых транзисторов мм-диапазона на основе широкозонных гетероструктур $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ 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 приборов мм-диапазона с необходимыми параметрами на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaIn}$ гетероструктур, а также оптимизации и улучшению существующих. В данной работе установлено, что, уменьшая толщину барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и подбирая длину затвора так, чтобы минимизировать произведение квадрата максимальной частоты усиления по току на выходное сопротивление, можно уменьшить высокочастотный коэффициент шума до его минимального значения за счёт уменьшения спектральной плотности случайных флуктуаций тока в канале полевого транзистора. Таким образом, результаты данной диссертационной работы позволяют снизить высокочастотный коэффициент шума в малощумящих усилителях мм-диапазона, изготовленных на широкозонных гетероструктурах $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$. В данной работе были изготовлены полевые транзисторы мм-диапазона на основе широкозонной гетероструктуры $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ с толщиной барьерного слоя 11.2 нм и длиной затвора 125 нм. Транзисторы имели значения $f_T = 90$ ГГц, $f_{\text{MAX}} = 200$ ГГц, а достигнутое значение минимального

коэффициента шума составляло 1 дБ на частоте 35 ГГц, что по коэффициенту шума сопоставимо с полевыми транзисторами на основе традиционных GaAs гетероструктур.

Практическая ценность разработанного метода экстракции значений малосигнальных шумовых моделей полевых транзисторов мм-диапазона из измерений непосредственно на пластине связана с возможностью быстрого и достаточно точного создания шумовых моделей для проектирования монолитных интегральных схем малошумящих усилителей мм-диапазона длин волн.

Личный вклад автора

Постановка задач диссертационной работы осуществлялась научным руководителем работы Рыжием В.И. Все эксперименты, представленные в диссертационной работе, обработка и интерпретация результатов были выполнены лично автором. Непосредственное участие коллег автора диссертации в проведенных исследованиях отражено в виде их соавторства в опубликованных работах. Результаты, выносимые на защиту и составляющие научную новизну работы, получены автором лично.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите

Содержание диссертационной работы соответствует специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Полнота изложения материалов в печати

Основное содержание диссертации достаточно полно отражено в 12 публикациях, включая публикации в научных журналах, из которых – 5 в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ в качестве ведущих рецензируемых журналов. Результаты исследований, составляющих диссертацию, докладывались на 5 международных и всероссийских конференциях.

Заключение

Учёный совет ИСВЧПЭ РАН после обсуждения диссертационной работы С.В. Михайловича оценивает её как научную квалификационную работу, которая по актуальности, объёму, новизне и значимости результатов полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Исходя из вышесказанного следует рекомендовать диссертацию С.В. Михайловича «Частотные и шумовые параметры наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaIn/GaN с разной толщиной барьерного слоя» к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук в диссертационном совете Д.002.204.01 в Физико-технологическом институте РАН по специальности 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Председатель Учёного совета,
д.т.н., профессор



 П.П. Мальцев

Учёный секретарь, к.ф.-м.н.

 Р.А. Хабибуллин

«05» мая 2016 г.