

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Михайловича Сергея Викторовича "Частотные и шумовые параметры наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaIn/GaN с разной толщиной барьерного слоя", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 — Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Радационно-стойкая и термостойкая электронная компонентная база (ЭКБ) для приборов и устройств силовой электроники СВЧ и микроволнового диапазона частот остро востребована широким спектром приборов и технических систем. При реализации маломощных СВЧ приборов предпочтение отдается арсениду галлия и твердым растворам на его основе (GaAs-AlAs, GaAs-InAs); здесь в настоящее время достигнуты значительные успехи. Существенные успехи достигнуты и в развитии силовой СВЧ и микроволновой электроники, в том числе в таких её актуальных направлениях как системы визуализации объектов в радиочастотном диапазоне $\Delta f = 10-30$ ГГц (радиолокация) и системы космической связи (мощные СВЧ усилители и генераторы).

Сравнительный анализ эффективности использования различных материалов для изготовления твердотельных приборов и устройств СВЧ электроники, выполненный с использованием таких их основных характеристик как подвижность и скорость насыщения носителей, теплопроводность, а также потери мощности связанные с выделением "джоулевого" тепла и с перезарядкой входной емкости приборов, позволяют получить шкалу сравнительной эффективности использования различных материалов в разработках ЭКБ для силовой СВЧ и микроволновой электроники. Благодаря существенно более высокой электрической прочности и теплопроводности к наиболее эффективным материалам для приборов твердотельной силовой электроники, с учетом достаточно развитой на сегодня его приборной маршрутной технологической базой, относится нитрид галлия и его твердые растворы. На нитриде галлия сегодня создана линейка полевых транзисторов перекрывающих диапазон частот до 80 ГГц и мощностей до 180 Вт. Частотно-мощностные параметры реализованных GaN приборов упомянутой линейки таковы: 80 ГГц - 0.3 Вт, 4 ГГц - 15 Вт, 2.17 ГГц - 180 Вт.

Однако, реализовать работу приборов эффективных в частотном диапазоне свыше 40 ГГц и с мощностью свыше 10 - 20 Вт, оставаясь в рамках ЭКБ твердотельной электроники, затруднительно даже при использовании высокоэффективных материалов. Это связано с рядом принципиальных физических и конструкционных ограничений. Одно из них связано со значительным уменьшением коэффициента разветвления (а значит добротности) при частотах свыше 40 ГГц из-за значимости величин входной и паразитной емкостей силовых твердотельных усилительных приборов. В силу названной причины при столь высоких частотах потенциально ожидаемы и ухудшение такой важной для приборов характеристики как соотношение сигнал/шум.

Поэтому, исследования, анализ и разработка удобных алгоритмов для анализа взаимосвязи между высокочастотным коэффициентом шума в наногетероструктурных GaN полевых транзисторах миллиметрового диапазона и толщиной барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$, а также ёмкостью затвор/сток является чрезвычайно актуальной задачей. Эта задача являлась целью диссертации Михайлович С.В., откуда и следует её своевременность и актуальность.

Поставленная задача диссертантом решалась комплексно:

- Были изготовлены образцы полевых транзисторов миллиметрового диапазона частот на основе гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ с разной толщиной барьерного слоя и разными технологиями изготовления Т-образных затворов и омических контактов;
- Проведены расчётно-аналитические и экспериментальные исследования влияния толщины барьерного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и длины Т-образного затвора на коэффициент шума в миллиметровом диапазоне длин волн;
- Разработан метод экстракции значений элементов шумовых моделей полевых $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ транзисторов миллиметрового диапазона из измеренных S-параметров линейной схемы и коэффициента шума; создана библиотека функций для ЭВМ, позволяющая производить экстракцию значений элементов малосигнальных шумовых моделей полевых транзисторов в мм-диапазоне из измерений в диапазоне до 67 ГГц;
- Проведены измерения S-параметров и коэффициента шума серии образцов полевых транзисторов в миллиметровом диапазоне и построены шумовые модели измеренных наногетероструктурных полевых $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ транзисторов.

В процессе решения перечисленного комплекса задач, автором впервые был получен ряд принципиально важных результатов, имеющих научную новизну.

В частности, автором:

1. Впервые в миллиметровом диапазоне частот 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 гетеропереходных транзисторов с длиной затвора менее 200 нм.

2. 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.

3. Впервые для полевых транзисторов мм-диапазона на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ экспериментально обнаружена и объяснена зависимость высокочастотного коэффициента шума от произведения квадрата максимальной частоты усиления по току на выходное сопротивление.

4. 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.

Представленные результаты диссертационной работы расширяют знания о зависимости частотных и шумовых характеристик $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ полевых транзисторов мм-диапазона от толщины барьерного слоя и ёмкостной связи между затвором и стоком.

Практическая значимость

Ценность полученных результатов обусловлена разработкой практически удобных алгоритмов и методов. К таковым относится, в частности, и метод экстракции значений малосигнальных шумовых моделей полевых транзисторов мм-диапазона, позволяющий быстро и корректно создавать шумовые модели для проектирования микроволновых монолитных интегральных схем малошумящих усилителей.

Результаты работы были широко представлены на научных конференциях различного уровня и апробированы в конкретных разработках МИС усилителей мощности в миллиметровом диапазоне частот.

В качестве недостатка автореферата отмечу отсутствие в нем сравнения характеристик разработанных диссертантом аналого-вычислительных методик с характеристиками методик представленными в периодической научной литературе (в том числе не только "малосигнальных" методик, а и методик отражающих одновременно нелинейное поведение транзисторов и его шумовые характеристики). Это представляется важным, так как обсуждаемый базовый материал (GaN) и приборы на его основе имеют преимущества перед прототипами на основе GaAs-AlAs лишь в режимах больших сигналов и высоких температур.

Высказанные замечания не влияют на высокую оценку настоящей работы, которая является цельной, содержит требуемую новизну и выполнена на высоком научном и техническом уровне.

Заключение

Материал, представленный Михайловичем Сергеем Викторовичем в автореферате диссертации "Частотные и шумовые параметры наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaIn/GaN с разной толщиной барьерного слоя", является законченным научным исследованием, соответствует специальности 05.27.01 — "Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах". Высокий уровень исследований, новизна и значимость полученных результатов, позволяют квалифицировать диссертацию как безусловно, удовлетворяющую требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Михайлович Сергей Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук, а представленная диссертационная работа отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ.

Доктор физико-математических наук,
профессор НИУ МИЭТ



Э.А. Ильичев

Подпись Э.А. Ильичева заверяю

Начальник отдела кадров НИУ МИЭТ



С.В. Заболотный

" 3 " ноября 2016 г