

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Михайловича Сергея Викторовича «Частотные и шумовые параметры наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaN/GaN с разной толщиной барьерного слоя», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, по специальности: 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Актуальность диссертации.

Диссертационная работа Михайловича Сергея Викторовича посвящена исследованию шумовых свойств полевых транзисторов мм-диапазона на основе широкозонных гетероструктур AlGaN/GaN с разной толщиной барьерного слоя. Широкозонный материал GaN и тройные соединения на его основе обладают высокими пробивными напряжениями, скоростью электронов, хорошей теплопроводностью, а спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации, присущие этим материалам, способствуют образованию двумерного электронного газа в гетероструктурах AlGaN/GaN с плотностью на порядок большей, чем в гетероструктурах на основе GaAs или InP. Сочетание подобных уникальных свойств GaN даёт ряд преимуществ полевым СВЧ транзисторам, изготовленным на его основе, по сравнению с транзисторами на основе других соединений A_3B_5 . Одним из основных преимуществ транзисторов на GaN является высокое пробивное напряжение, одновременно с этим они могут обладать ещё и малым коэффициентом шума. На сегодняшний день весьма актуальной с практической точки зрения является задача создания на основе GaN малошумящих усилителей, способных выдерживать большие всплески напряжения от мощных электромагнитных импульсов. А поскольку основным компонентом усилителя является полевой транзистор, то необходимо детальное изучение параметров транзисторов. Поэтому выбранная Михайловичем С.В. тема

диссертационной работы по исследованию частотных и шумовых параметров наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaIn/GaN является весьма интересной и актуальной как с практической, так и с научной точки зрения.

Анализ и оценка содержания диссертации.

Диссертация Михайловича С.В. изложена на 112-ти страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, а также списка цитируемой литературы.

В первой главе приводится обзор литературы. Анализируется тенденция развития технологии изготовления полевых транзисторов на основе GaN. Освещаются подходы, используемые для описания коэффициента шума. Перечисляются основные физические источники шума. Приводятся методы построения эквивалентной шумовой схемы полевого транзистора. Глава заканчивается выводами, формулирующими основные вопросы, рассматриваемые в диссертационной работе.

Вторая глава посвящена экспериментальным и теоретическим методам исследования. В первом разделе приводится описание трёх технологических маршрутов, по которым изготавливались полевые транзисторы. Рассказывается об особенностях изготовления Т-образных затворов. Отмечается, что транзисторы изготавливались на 11-ти гетероструктурах AlGaIn/AlN/GaN, в которых толщина барьера изменялась в пределах от 11.2 до 33 нм. Во втором разделе приводятся методы измерения омического сопротивления, S-параметров и коэффициента шума. В третьем разделе представлен разработанный автором метод экстракции значений элементов эквивалентной схемы полевого транзистора. По сути, метод основан на алгоритмах поиска минимума целевой функции, представляющей из себя разность между измеренными параметрами транзистора и рассчитанными с помощью эквивалентной схемы. Показывается, каким образом необходимо выбирать начальное приближение и ограничивать область поиска. В следующем разделе представлен метод определения параметров источников

шума из измерений коэффициента шума с помощью преобразования матриц спектральных плотностей колебаний тока на выводах четырёхполюсника.

Третья глава является полностью теоретической. В первом разделе анализируется зависимость коэффициента шума от толщины барьерного слоя гетероструктуры и длины затвора. Анализ основан на матричных преобразованиях спектральных плотностей флуктуаций токов четырёхполюсника. Показывается, что коэффициент шума можно выразить через безразмерный параметр, который обратно пропорционален произведению квадрата частоты отсечки на выходное сопротивление. Далее, используя результаты иностранной экспериментальной работы, показывается, что при фиксированной толщине барьерного слоя и длине затворов транзисторов от 60 до 250 нм значения коэффициента шума локализованы в определённой области, которая при уменьшении барьера перемещается в сторону уменьшения коэффициента шума. Во втором разделе анализируются частотные параметры полевых транзисторов на основе GaN. Суть анализа заключается в том, что если устремить сопротивление омических контактов и длину затвора к нулю (технологический предел), то частота отсечки по току будет определяться отношением дрейфовой скорости электронов к произведению толщины барьерного слоя на ёмкостную связь между затвором и стоком.

В четвёртой главе представлены экспериментальные данные. В первом разделе приведены основные параметры полевых транзисторов. Во втором разделе показывается, что для полевых транзисторов с длиной затвора менее 200 нм коэффициент шума определяется не только частотой отсечки по току, но и выходной проводимостью. Так, транзистор с крутизной 500 мС/мм и выходной проводимостью 45.5 мС/мм имеет значение коэффициента шума 1.7 дБ на частоте 35 ГГц, а у транзистора с крутизной 450 мС/мм и выходной проводимостью 18.5 мС/мм коэффициент шума 1 дБ, на 0.7 дБ меньше из-за низкого значения выходной проводимости. В следующем разделе показывается экспериментально, что при уменьшении толщины барьера

AlGaN с 33 до 11.2 нм коэффициент шума уменьшается с 5 до 1 дБ. В четвертом разделе анализируется влияние ёмкостной связи между затвором и стоком на коэффициент шума.

Диссертация заканчивается пятью выводами.

Автореферат соответствует основному содержанию и выводам диссертации.

Степень обоснованности научных положений и выводов.

При решении задач, представленных в работе, автор опирался на ряд теоретических и практических данных. Выводы и положения, сформулированные в диссертации, основаны на ряде физических моделей, большом количестве образцов транзисторов, изготовленных на различных гетероструктурах и по трём технологическим маршрутам с достаточно подробными измерениями их характеристик. Все научные выводы и положения подтверждены численным моделированием, теоретическим анализом, сравнением с ранее известными результатами и применением их при изготовлении СВЧ приборов мм-диапазона.

Оценка новизны и достоверности.

Научная новизна работы Михайловича С.В. прежде всего состоит в том, что в ней впервые проведено систематическое исследование влияния толщины барьерного слоя широкозонных гетероструктур AlGa_xN/AlN/GaN на коэффициент шума полевых транзисторов. Помимо этого, в работе показано, что для транзисторов с затвором менее 200 нм коэффициент шума будет обратно пропорционален произведению квадрата частоты отсечки по току на выходное сопротивление. Также экспериментально показано влияние ёмкостной связи между затвором и стоком. Разработан метод экстракции значений элементов шумовой модели полевого транзистора мм-диапазона на основе GaN.

Достоверность результатов диссертационной работы Михайловича С.В. обусловлена применением современных экспериментальных методов изготовления транзисторов, а также современных и общепризнанных

методик измерения транзисторных характеристик. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат ранее известным данным. Основные результаты и выводы диссертационной работы широко освещены в научных изданиях и прошли апробацию на Российских и Международных конференциях и научных семинарах. По результатам диссертации опубликовано 12 работ в научных журналах и сборниках трудов международных и российских конференций, из них 5 опубликованы в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Публикации автора в полной мере отражают результаты, изложенные в диссертации.

Практическое значение результатов диссертации.

Результаты работы могут быть использованы в ОАО «Научно-производственное предприятие «Пульсар», АО «Научно-производственное предприятие «Исток» им. Шокина», АО «Научно-производственная фирма «Микран», НИЦ «Курчатовский институт».

Замечания по диссертационной работе.

1. В первом пункте четвёртой главы содержится достаточно большая таблица с перечислением характеристик полученных транзисторов. На мой взгляд, было бы лучше перенести таблицу в приложение, а в самом тексте сделать на неё ссылку.

2. В диссертации и автореферате соискатель отмечает, что исследовались полевые транзисторы на основе гетероструктур $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ с длиной затвора менее 200 нм, но при этом не указывается нижняя граница длин затворов.

3. В работе сравниваются значения коэффициентов шума на частоте 35 ГГц, при этом, чем обусловлен выбор данной частоты, не объясняется.

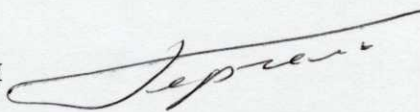
4. В третьей главе говорится, что спектральная плотность случайных флуктуаций тока со стороны стока обусловлена флуктуациями тока в канале транзистора из-за флуктуаций дрейфовой скорости электронов. На самом

деле плотность тока пропорциональна произведению концентрации электронов на их скорость. Всё-таки было бы интересно рассмотреть вопрос влияния флуктуаций концентрации электронов на коэффициент шума.

Тем не менее отмеченные недостатки не принижают общего высокого уровня выполненной работы. Исходя из полноты решения поставленных задач и качества проведённых исследований, считаю, что диссертационная работа Михайловича С.В. «Частотные и шумовые параметры наногетероструктурных полевых транзисторов на основе AlGaIn/GaN с разной толщиной барьерного слоя», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, является научно-квалификационной работой, удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Михайлович Сергей Викторович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Официальный оппонент:

Гергель Виктор Александрович



доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией
Федерального государственного учреждения науки Института радиотехники
и электроники им. Котельникова В.А. РАН (ИРЭ РАН)

Почтовый адрес: 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7.

E-mail: ire@cplire.ru, тел. +7 (495) 629 3574

Подпись В.А. Гергеля заверяю



Учёный секретарь ИРЭ РАН,
к.ф.-м.н., И.И. Чусов