

## 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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

### Актуальность диссертации

В диссертационной работе Михайловича Сергея Викторовича исследуются шумовые свойства СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур AlGaN/GaN с различной толщиной барьерного слоя. По сравнению с другими соединениями класса  $A^{III}B^V$  (GaAs, InP), GaN обладает существенно большей шириной запрещённой зоны, высокой дрейфовой скоростью и плотностью носителей, а также высокой теплопроводностью.

До последнего времени транзисторы на основе GaN позиционировались прежде всего как мощные приборы, характеризующиеся высоким пробивным напряжением, но вместе с этим и высоким уровнем шума. Однако по мере накопления знаний в данной области и развития технологии эпитаксиального роста гетероструктур AlGaN/GaN с малой толщиной барьера становится ясно, что GaN-транзисторы вполне могут быть основой схем малошумящих усилителей в мм-диапазоне частот, сохраняя при этом все преимущества, связанные с высокой шириной запрещённой зоны. Исходя из этого, требуется глубокое изучение шумовых и частотных характеристик транзисторов на основе гетероструктур AlGaN/GaN, поэтому выбранная диссертантом тема диссертационной работы является чрезвычайно актуальной как в научном, так и в практическом плане.

## 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.

Первая глава посвящена обзору литературы, который состоит из анализа направления развития технологии полевых транзисторов на основе широкозонных гетероструктур AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, анализа источников шума и подходов для описания коэффициента шума, а также анализа методов построения шумовых моделей транзисторов. В конце главы формулируются основные вопросы, рассматриваемые в диссертационной работе.

Во второй главе рассматриваются экспериментальные и теоретические методы исследования. В первом разделе описываются технологические маршруты изготовления транзисторов на гетероструктурах AlGa<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> с толщиной барьерного слоя от 11,2 до 33 нм. Рассматриваются особенности создания Т-образных затворов. Во втором разделе освещаются методы измерения сопротивления омических контактов, частотных параметров и коэффициента шума. Третий раздел посвящён разработанному автором методу определения значений элементов эквивалентной схемы полевого транзистора. Определение значений элементов заключается в поиске минимума целевой функции, являющейся разностью между измеренными транзисторными характеристиками и рассчитанными с помощью эквивалентной схемы. Обосновывается способ выбора начального приближения и границ области поиска. В следующем разделе описывается методика определения значений источников высокочастотного шума на основе измерений коэффициента шума. Метод основан на преобразованиях матриц спектральных плотностей колебаний тока на входе и выходе четырёхполюсника.

Третья глава посвящена теоретическому анализу. В первом разделе рассматривается зависимость коэффициента шума от толщины барьерного слоя гетероструктуры и длины затвора. Анализ производится на основе

преобразования матриц спектральных плотностей колебаний токов на входе и выходе четырёхполюсника. При таком подходе коэффициент шума выражается через безразмерный параметр, который обратно пропорционален произведению квадрата максимальной частоты усиления по току на выходное сопротивление. Используя результаты крупной зарубежной экспериментальной работы, автор показывает, что при фиксированной толщине барьерного слоя и переменной длине затвора от 60 до 250 нм значения коэффициента шума сосредоточены в определённой области, которая при уменьшении толщины барьера движется в направлении уменьшения коэффициента шума. Второй раздел посвящён анализу максимальной частоты усиления по току полевых GaN-транзисторов.

Четвёртая глава содержит экспериментальные данные. Первый раздел содержит основные параметры изготовленных образцов полевых GaN-транзисторов. Во втором разделе экспериментально демонстрируется, что коэффициент шума полевых GaN-транзисторов с длиной затвора менее 200 нм определяется не только частотой отсечки по току, но и выходной проводимостью. В частности, показывается, что у транзистора с крутизной 500 мС/мм и выходной проводимостью 45.5 мС/мм коэффициент шума составляет 1.7 дБ на частоте 35 ГГц, а у транзистора с крутизной 450 мС/мм и выходной проводимостью 18.5 мС/мм – 1 дБ, что на 0.7 дБ меньше вследствие более низкого значения выходной проводимости. В следующем разделе экспериментально показывается, что при уменьшении толщины барьера AlGaN с 33 до 11 нм коэффициент шума уменьшается с 5 до 1 дБ. В четвёртом разделе анализируется влияние ёмкостной связи между затвором и стоком на коэффициент шума.

**Автореферат** изложен на 24 страницах, включает 6 рисунков, 1 таблицу и список основных работ диссертанта, а также полностью соответствует основному содержанию и выводам диссертации.

