

**Тихомиров В.Г.<sup>1,4</sup>, Земляков В.Е.<sup>5</sup>, Цацульников А.Ф.<sup>2,3</sup>, Волков В.В.<sup>4</sup>,  
Парнес Я.М.<sup>4</sup>, Янкевич В.Б.<sup>1</sup>, Вьюгинов В.Н.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup> Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе РАН

<sup>3</sup> Научно-технологический центр микроэлектроники и

субмикронных гетероструктур РАН

<sup>4</sup> ЗАО «Светлана-Электронприбор»

<sup>5</sup> Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

## **Исследования толщины барьерного слоя в гетероэпитаксиальных структурах AlGaIn/GaN**

*Проведено численное моделирование СВЧ-транзисторов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN (HEMT). Выполнены измерения основных выходных характеристик изготовленных приборов. Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о возможности эффективного использования численного моделирования для оптимизации СВЧ HEMT транзисторов.*

### **Ключевые слова: численное моделирование, GaN СВЧ транзисторы**

В рамках настоящей работы проводилось численное моделирование и расчетная оптимизация полевых СВЧ-транзисторов [1,2] на основе гетероструктур AlGaIn/GaN (HEMT). Исследуемые приборы были изготовлены в ЗАО «Светлана-Электронприбор» на базе гетероструктур, разработанных и изготовленных в ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН [3]. Следует также отметить, что производство подложек в России развёрнутое на ЗАО «Светлана-Электронприбор», в сочетании с развитой технологией эпитаксиального роста в НТЦ микроэлектроники РАН позволило провести оптимизацию технологии подготовки подложек по результатам эпитаксиального роста. Как показали проведенные ранее эксперименты, значительное влияние на характеристики исследуемых полевых транзисторов оказывают параметры барьерного слоя HEMT гетероструктуры, расположенного сверху и состоящего из нелегированного материала AlGaIn. На рис.1 показано схематическое поперечное сечение транзисторной гетероструктуры AlGaIn/GaN и соответствующая диаграмма энергетических зон.

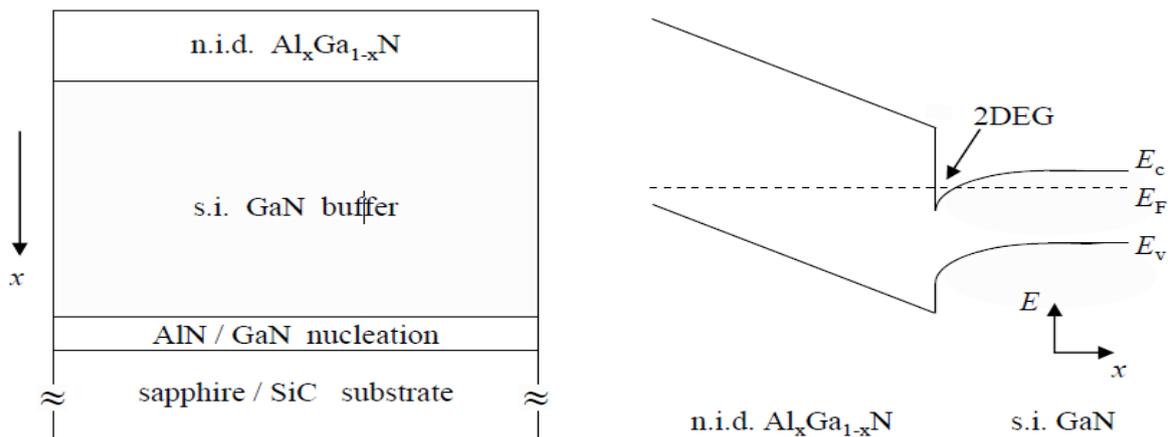


Рисунок 1. Схематическое поперечное сечение транзисторной гетероструктуры AlGaN/GaN и соответствующая диаграмма энергетических зон.

На первом этапе работы проводилась адаптация численных моделей стандартного пакета технологического численного моделирования к особенностям конструкции и технологии реальных приборных структур, после чего были выполнены расчеты статических вольт-амперных характеристик НЕМТ транзисторов с субмикронной длиной затвора. Рис.2. иллюстрирует пример расчета набора ВАХ для исследуемого гетероструктурного полевого транзистора и ее сравнение с семейством экспериментальных характеристик, выделенных красным и синим цветом.

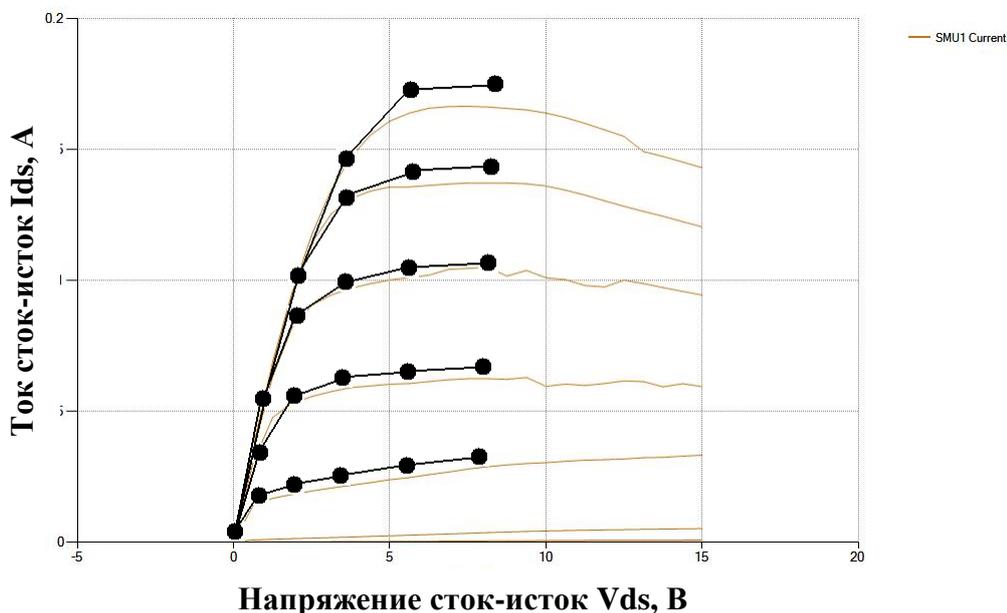


Рисунок 2. Результат расчета набора ВАХ для исследуемого гетероструктурного полевого транзистора.

На втором этапе исследований были выполнены расчеты вариантов гетероструктуры с различной толщиной барьерного слоя и предложены пути оптимизации конструкции транзисторов. Кроме того, исследовалось влияние некоторых конструктивных, топологических и технологических параметров на выходные характеристики транзисторов [4-5].

Так, в ходе проведения численного эксперимента показано, что с ростом толщины барьерного слоя в пределах от 10 до 20 нанометров, происходит значительный рост тока стока,

при неизменном напряжении на затворе. Численные расчеты позволили увидеть, что наращивать толщину барьерного слоя выше некоторого значения не имеет смысла, поскольку при этом происходит существенное снижение крутизны.

Для верификации модели были выращены различные эпитаксиальные структуры GaN на различных подложках, в которых изменялись толщина барьерного слоя и некоторые его характеристики. В качестве тестового элемента был выбран транзистор с двумя затворами шириной 180 мкм, изображенный на рис.3.

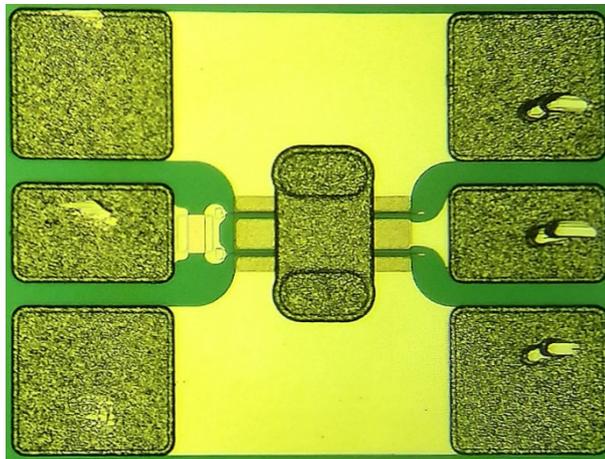


Рисунок 3. Фотография транзистора с двумя затворами шириной 180 мкм

Транзистор имеет конструкцию, позволяющую удобно проводить измерения с помощью копланарных зондов, в том числе СВЧ параметров. Тестовые транзисторы изготавливаются методами оптической фотолитографии и имеют затвор длиной около 0.6 мкм. В омических контактах использована стандартная металлизация из Ti/Al/Ni/Au, в барьерном контакте Ni/Au. Затворы пассивированы слоем Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, нанесенного методом плазмохимического осаждения.

Немаловажным параметром транзисторов на основе гетероструктур AlGaN/GaN является коллапс тока. Этот эффект обусловлен быстрым захватом электронов на центры, долго удерживающие электроны. Это приводит к образованию заряженных областей на поверхности и в объеме эпитаксиальных структур, выступающих в роли дополнительных «виртуальных затворов», снижающих ток транзистора. Степень уменьшения тока пропорциональна концентрации ловушек, и характеризует качество ГЭС. Для оценки величины токового коллапса были измерены импульсные ВАХ с помощью специализированного оборудования, позволяющего выбирать начальную точку развертки ВАХ (точку покоя), то есть напряжение на затворе (UGS) и напряжение между истоком и стоком (UDS). Результаты измерений представлены на Рис. 4.

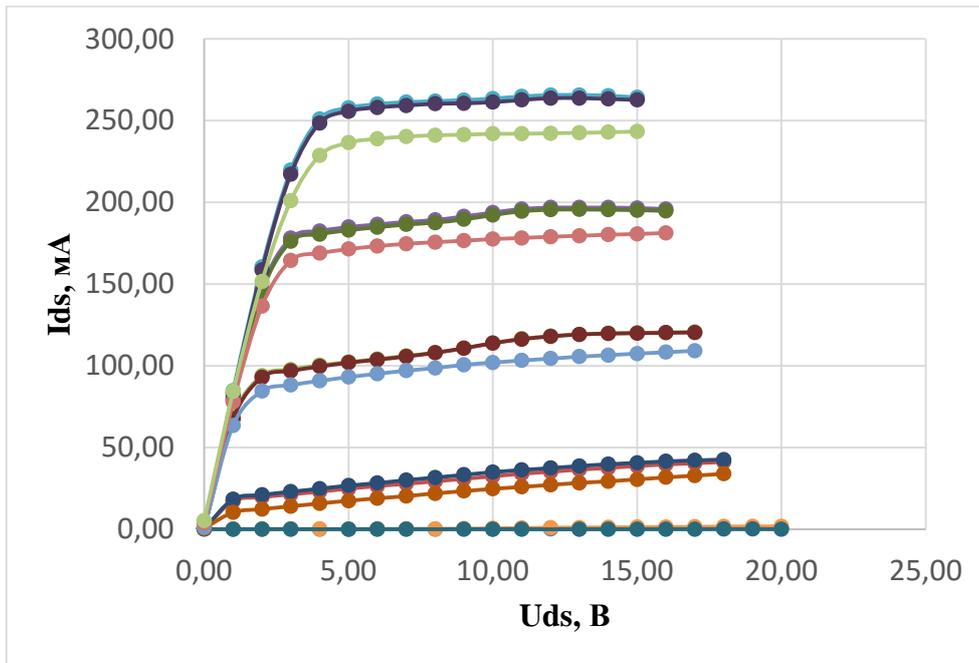


Рисунок 4. ВАХ транзистора 2x180 мкм, демонстрирующая эффект коллапса тока

Некоторые результаты измерений выходных СВЧ характеристик на частоте 3 ГГц представлены на Рис.5.

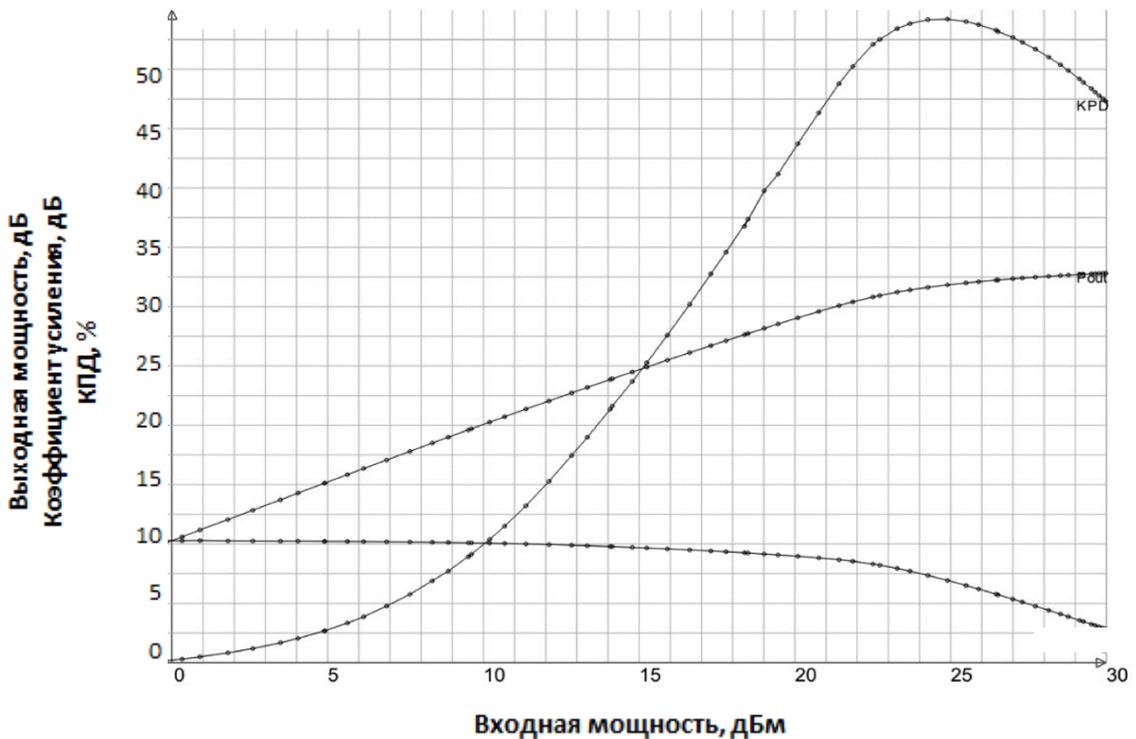


Рисунок 5. Результаты измерений некоторых выходных характеристик (КПД, выходной мощности и усиления) изготовленных транзисторов.

В результате выполненных исследований хорошо видно, что значительный интерес для изготовления мощных приборов может представлять диапазон толщин барьерного слоя в пределах от 20 до 30 нанометров. Кроме того, результаты выполненных исследований позволяют

сделать вывод о возможности эффективного использования численного моделирования СВЧ НЕМТ транзисторов для оптимизации конструкций гетероструктур на основе нитрида галлия.

Библиографический список

1. Н. Brech, T. Grave, T. Simlinger, S. Selberherr, «Optimization of Pseudomorphic HEMT's Supported by Numerical Simulations», IEEE Trans. Electron Devices, vol. 44, N.11, pp. 1822-1828, 1998
2. В.Г.Тихомиров, Н.А.Малеев, В.Б.Янкевич, В.М.Устинов, Численное моделирование полевых СВЧ-транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs-InGaAs-GaAs, XVI Координационный научно-технический семинар по СВЧ технике, 8-10 сентября 2009 г, пос.Хахалы, Нижегородская обл
3. В.Е.Земляков, В.А.Красник, В.И.Васильев, С.А.Легенкин, Н.А.Малеев, А.Е.Жуков, А.П.Васильев, В.С.Михрин, В.М.Устинов, «Гетероструктурные полевые транзисторы миллиметрового диапазона длин волн ФГУП НПП «Исток», 15 Int.Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2005), 12-16 Sept. 2005, Sevastopol, Crimea, Ukraine
4. В.Г. Тихомиров, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, Ю.В. Соловьев, А.Г. Гладышев, М.М. Кулагина, В.Е. Земляков, К.В. Дудинов, В.Б. Янкевич, А.В. Бобыль, В.М. Устинов. Исследование влияния параметров затворной области на статические характеристики полевых СВЧ-транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs-InGaAs-GaAs. Физика и техника полупроводников, 2011, том 45, вып. 10
5. Е.Ю.Днестранская, А.М. Емельянов, К.В Дудинов, В.Г.Тихомиров, Ю.В.Федоров. ИССЛЕДОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaN ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА. Матер. всероссийской научно-технической конференции, "Микроэлектроника СВЧ". Санкт-Петербург, 4-7июня 2012, т.1, с.69-72.