

**В.Г.Тихомиров^{1,2}, Н.А.Малеев², А.Г.Кузьменков²,
В.Е.Земляков⁴, А.В.Крутов⁴,
А.Ю.Егоров³, В.Б.Янкевич¹, В.М.Устинов²**

¹ ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

² Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

³ Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий РАН

⁴ ФГУП "Научно-производственное предприятие "Исток"

Численное моделирование и экспериментальное исследование полевых СВЧ-транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур для мощных МИС модулей АФАР

Проведено численное моделирование и расчетная оптимизация полевых СВЧ-транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs-InGaAs-GaAs (pHEMT). Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о возможности достаточно эффективного использования программного пакета TCAD SILVACO для численного моделирования СВЧ pHEMT транзисторов с учетом основных физических явлений и особенностей реальных приборных конструкций.

Ключевые слова: численное моделирование, полевые СВЧ транзисторы

Основой современных полупроводниковых СВЧ приборов служат наногетероструктуры. Характерные топологические размеры для современных СВЧ-транзисторов составляют десятые доли микрометра, а толщины слоев зачастую составляют единицы нанометров. Изготовление и диагностика таких приборных структур возможны только с применением самых современных технологических и аналитических методов, обладающих возможностью управляемого синтеза сверхтонких эпитаксиальных слоев, формирования субмикронной топологии и локальной диагностики свойств приборных структур на пространственных масштабах в единицы-десятки нанометров. В связи с этим, экспериментальная оптимизация гетероструктурных СВЧ-транзисторов является сложной, трудоемкой и затратной процедурой [1].

Использование методов математического моделирования, базирующихся на многомерных численных моделях расчета транспорта носителей, тепловых процессов и динамических характеристик [2] позволяет дополнить, проверить и объяснить существующие экспериментальные данные, а зачастую и предсказать поведение приборных структур при изменении параметров, которые затруднительно экспериментально воспроизвести. Такие возможности открывает использование современных пакетов численного моделирования полупроводниковых приборов [3,4]. Однако оптимальный выбор и эффективное использование того или иного пакета возможно только после верификации его возможностей для решения определенного класса задач, что требует получения параметров используемых моделей с учетом свойств конкретного объекта моделирования.

В рамках настоящей работы проводилось численное моделирование и расчетная оптимизация полевых СВЧ-транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs-InGaAs-GaAs (рНЕМТ). Исследуемые приборы были изготовлены в ЗАО «Светлана-Электронприбор» и ФГУП «НПП «Исток» на базе эпитаксиальных гетероструктур, разработанных и изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии в ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН [5] и АФТУ РАН.

Как показали проведенные ранее исследования, наибольшее влияние на характеристики гетероструктурных полевых транзисторов оказывают параметры затворной области (толщины состав и профиль легирования отдельных слоев, геометрические размеры и профиль затворной канавки, топологические размеры и пространственное расположение затворного электрода). Выбор оптимальных параметров затворной области оказался чрезвычайно важен, например, для получения оптимальных СВЧ характеристик при заданной длине затворного электрода, обеспечения требуемого уровня пробивного напряжения, повышения устойчивости характеристик прибора к возможным флуктуациям параметров технологических процессов.

На первом этапе работы проводилась адаптация численных моделей к особенностям конструкции и технологии реальных приборных структур, после чего были выполнены расчеты статических вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, динамических характеристик (s-параметры в заданном диапазоне частот) и тепловых характеристик тестовых рНЕМТ транзисторов с субмикронной длиной затвора. Рис. 1. иллюстрирует пример расчета набора ВАХ для исследуемого гетероструктурного полевого транзистора и ее сравнение с семейством экспериментальных характеристик.

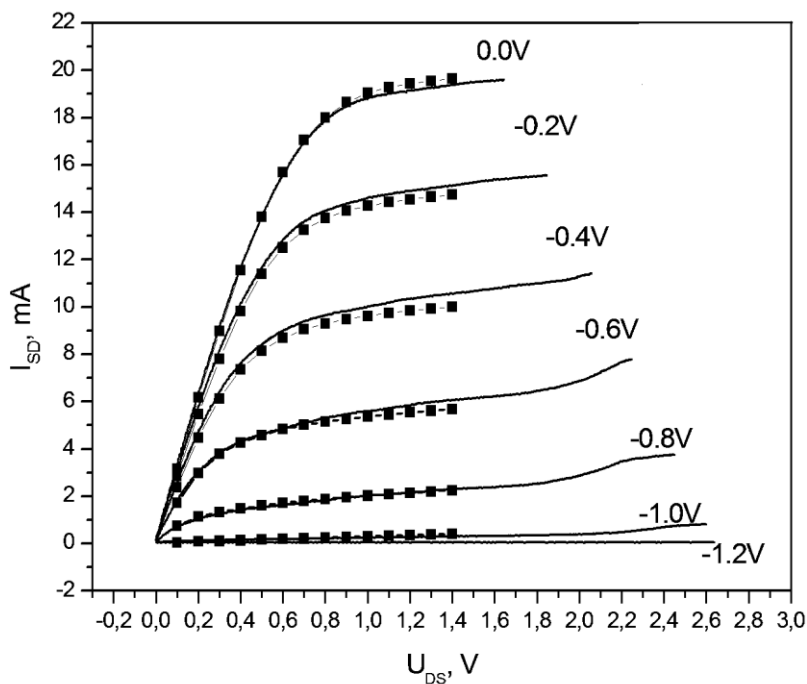


Рисунок 1

На втором этапе исследований были выполнены расчеты различных вариантов конструкции гетероструктурных полевых транзисторов и предложены пути их оптимизации. В частности, исследовалось влияние конструктивных, топологических (включая 2D-топологию) и технологических параметров на выходные характеристики транзисторов. Для исследованной конструкции транзисторной гетероструктуры обнаружено сильное влияние не только глубины расположения затвора, но и формы и расположения подзатворной канавки на статические ВАХ (см. табл.1 и рис.2).

Таблица 1

Статические параметры	Глубина травления 0,084 мкм	Глубина травления 0,080 мкм
Удельный ток насыщения стока, мА/мм	250	300
Удельная крутизна, мСм/мм	290	210
Напряжение насыщения стока, В	1,1	1,3
Напряжение отсечки затвора, В	-0,87	-1,13

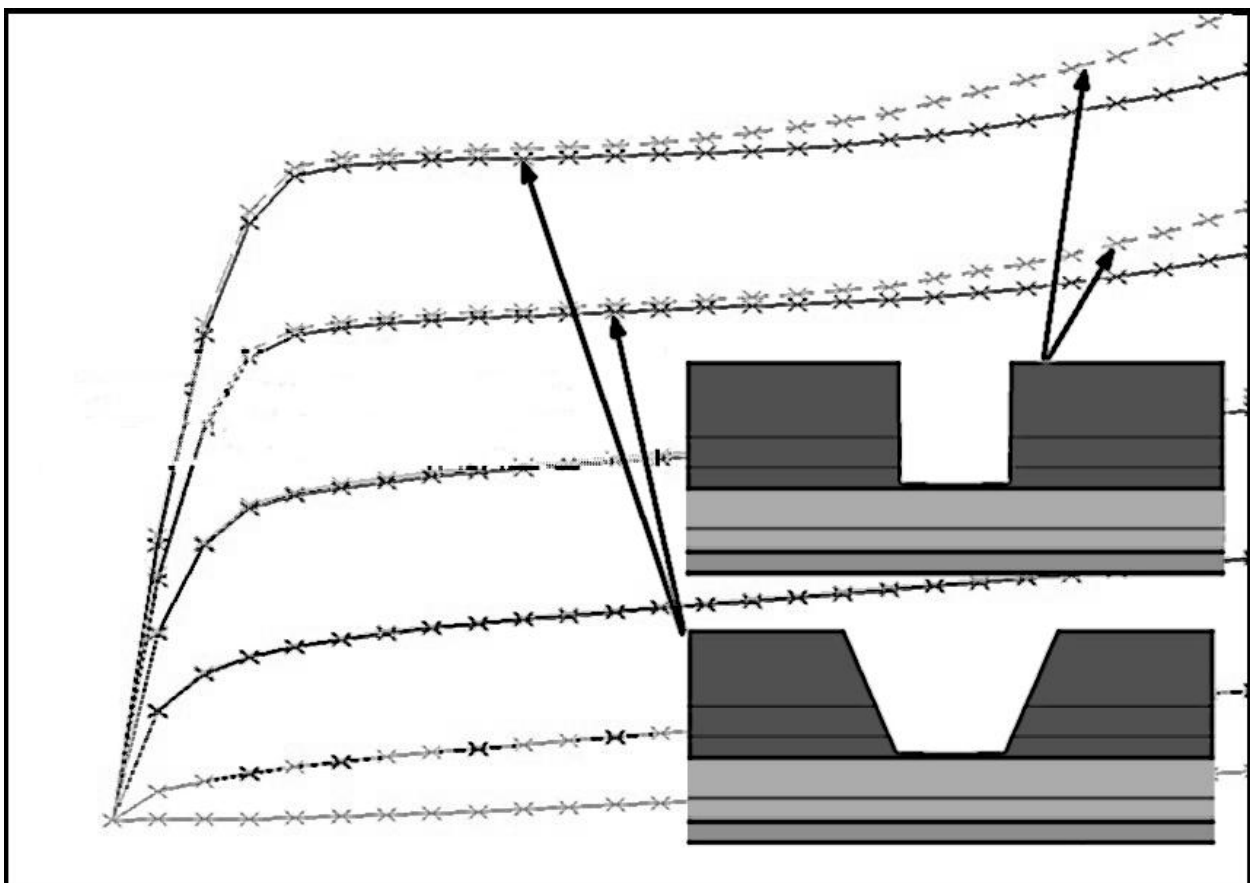


Рисунок 2

Существенный интерес для мощных приборов представляет исследование влияния формы затворной канавки на пробивное напряжение затвор-сток, определяющее предельные

режимы эксплуатации транзистора. Возможности эксперимента в данном случае ограничены сложностью прецизионного варьирования параметров затворной канавки в пределах конкретной исследуемой структуры. С другой стороны, корректное моделирование пробивного напряжения является весьма сложной задачей. На рис.3 представлена типичная вольт-амперная характеристика диода затвор-сток, измеренная для изготовленного рНЕМТ-транзистора с длиной затвора 0,3 мкм, расстоянием сток-исток 2,5 мкм, шириной затворной канавки около 0,6 мкм и проектной глубиной травления затворной канавки 84 нм. В отличие от классической картины пробоя диодов с барьером Шоттки, в данном случае после начала пробоя при обратном напряжении затвор-сток около 6В наблюдается плавное нарастание тока вплоть до обратного напряжения около 13В, после чего обратный ток затворного диода начинает резко возрастать.

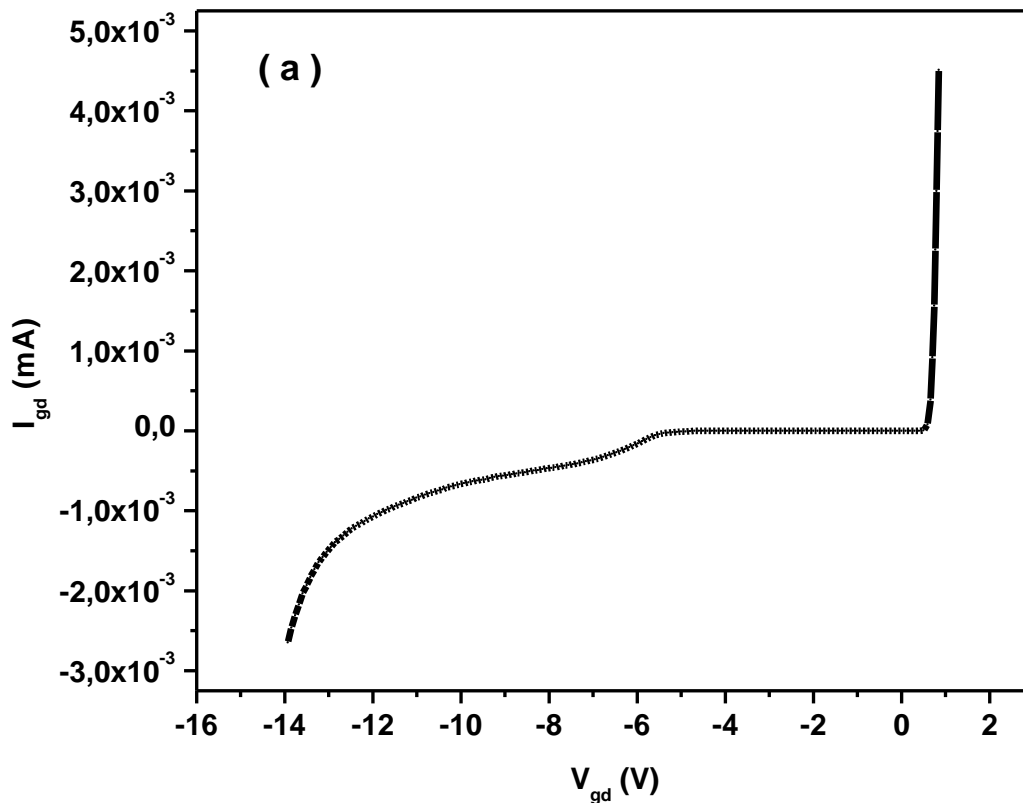


Рисунок 3

Такой «плавный» характер пробоя можно успешно использовать для улучшения предельных рабочих характеристик усилителей мощности за счет увеличения максимального напряжения сток-исток при сохранении приемлемого уровня тока в затворной цепи. Для адекватного описания вольт-амперных рНЕМТ транзисторов в режиме пробоя потребовалось построение полной модели энергетического баланса с учетом разогрева носителей, эффектов насыщения скорости, неполной ионизации и генерации носителей в области сильных полей. На рис.4 представлены результаты расчетов вольт-амперных характеристик сток-исток при напряжении на затворе -1,2В, близком к пороговому. Расчеты выполнялись для двух

рНЕМТ-транзисторов с длиной затвора 0,3 мкм, расстоянием сток-исток 2,5 мкм и глубиной затворной канавки 84 нм. Качественный вид вольт-амперных характеристик и полученные значения пробивных напряжений (15-25В) хорошо соответствуют экспериментальным данным для изготовленных транзисторов. Налицо существенная зависимость величины расчетного значения пробивного напряжения от длины затворной канавки L_{ch} , которая наблюдается и в эксперименте.

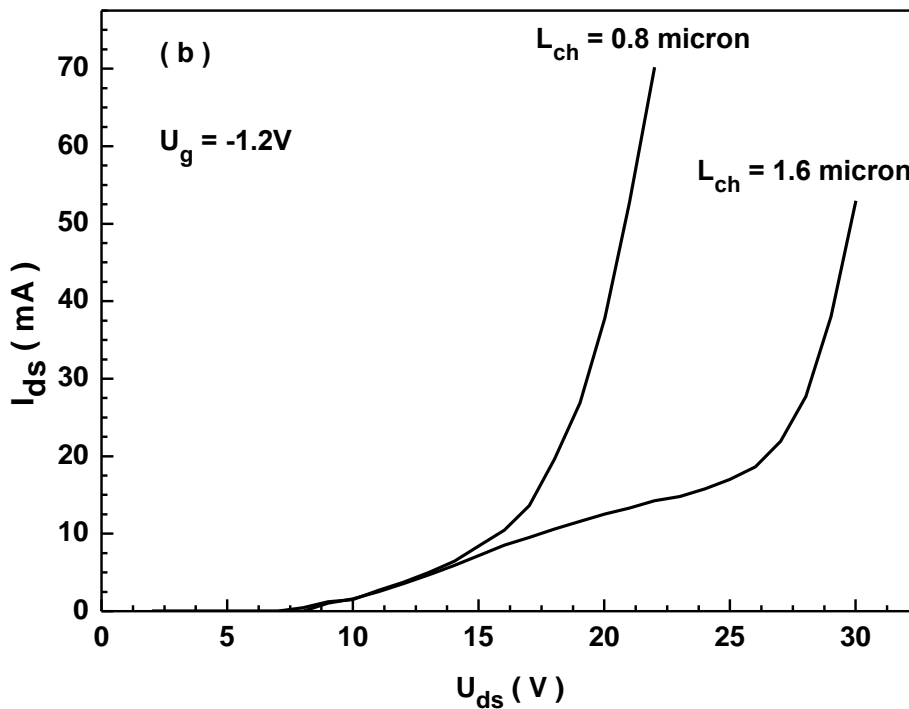


Рисунок 4

Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о возможности эффективного использования численного моделирования СВЧ рНЕМТ транзисторов для оптимизации конструкций гетероструктур для мощных МИС модулей АФАР.

Библиографический список

1. M. Malmkvist, S. Wang, J.V. Grahn, «Epitaxial Optimization of 130-nm Gate-Length InGaAs/InAlAs/InP HEMTs for High-Frequency Applications», IEEE Trans. Electron Devices, vol. 55, N.1, pp. 268-274, 2008
2. H. 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
3. V. Palankovski, R. Quay, S. Selberherr, «Industrial Application of Heterostructure Device Simulation», IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 36, N. 9, pp.1365-1370, 2001
4. SILVACO International, «ATLAS user's manual. DEVICE SIMULATION SOFTWARE», Santa Clara, CA, 2010
5. 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 НИИ «Исток», 15 Int.Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2005), 12-16 Sept. 2005, Sevastopol, Crimea, Ukraine