

**В.Г. Тихомиров^{1,2}, Н.А. Малеев², А.Г. Кузьменков²,
Ю.В. Соловьев², А.Г. Гладышев², М.М. Кулагина²,
В.Е. Земляков⁴, К.В. Дудинов⁴, А.Ю. Егоров³, В.Б. Янкевич¹,
В.М. Устинов²**

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

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

³ Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский Академический университет - научно-образовательный центр нанотехнологий РАН

⁴ ФГУП "Научно-производственное предприятие "Исток"

Численное моделирование и экспериментальное исследование влияния физико-топологических и технологических особенностей затворной области на характеристики полевых СВЧ-транзисторов для МИС модулей АФАР.

Приведены некоторые результаты численного моделирования и экспериментального исследования влияния параметров затворной области на статические характеристики полевых СВЧ-транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs-InGaAs-GaAs (pHEMT). Продемонстрирована возможность корректного моделирования статических характеристик реальных приборных конструкций pHEMT-транзисторов с использованием средств численного моделирования. Показана принципиальная необходимость использования селективного травления затворной канавки для контролируемого и воспроизводимого получения требуемых приборных характеристик.

Ключевые слова: численное моделирование, полевые СВЧ транзисторы

В настоящей работе рассмотрены результаты численного моделирования и экспериментального исследования влияния параметров затворной области на статические характеристики полевых СВЧ-транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs-InGaAs-GaAs (pHEMT-транзисторы). 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 и АФТУ РАН.

Для корректного расчета характеристик реальных транзисторов необходимо выбрать адекватный набор математических моделей из предлагаемого в выбранном пакете программ набора [1-4], а затем выполнить адаптацию параметров математических моделей и, наконец, произвести калибровку адаптированных моделей. Для калибровки параметров моделей, помимо измеренных статических характеристик тестовых транзисторов с относительно длинным затворным электродом,

использовалась совокупность проектных и экспериментальных данных для отдельных элементов, составляющих приборную структуру: проектные значения состава, толщины и уровня легирования отдельных слоев, измеренные на тестовых структурах подвижность носителей в канале и слоевые сопротивления, сопротивления контактных областей, основные топологические размеры транзисторной структуры измеренные с помощью растровой электронной микроскопии. Необходимость точного, с погрешностью единицы процентов, описания экспериментальных характеристик, а также прогнозирования важнейших характеристик транзисторов, в том числе особенностей пробоя затвор-сток, потребовало построения моделей для статистики распределения носителей во всех областях структуры, модели отрицательной дифференциальной подвижности в трех основных материалах (GaAs, InGaAs и AlGaAs) при различном уровне легирования каждого, а также тщательной настройки модели полного энергетического баланса транспорта носителей в канале рНЕМТ-транзистора для учета разогрева основных носителей и адекватного описания процесса пробоя. В качестве основных критериев адекватности выбранных моделей использовались требования максимально точного описания экспериментальных статических характеристик базового варианта транзистора и корректного предсказания его поведения в случае изменения определенных физико-топологических параметров (длины затвора, глубины затворной канавки и др.).

На рис.1 представлены расчетные и экспериментальные зависимости тока сток-исток I_{ds} от напряжения сток-исток U_{ds} при разных значениях напряжения затвор-исток U_{gs} исследуемого рНЕМТ-транзистора. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных вольт-амперных характеристик, наблюдаемое для сложных транзисторных гетероструктур, служит подтверждением адекватность построенной численной модели.

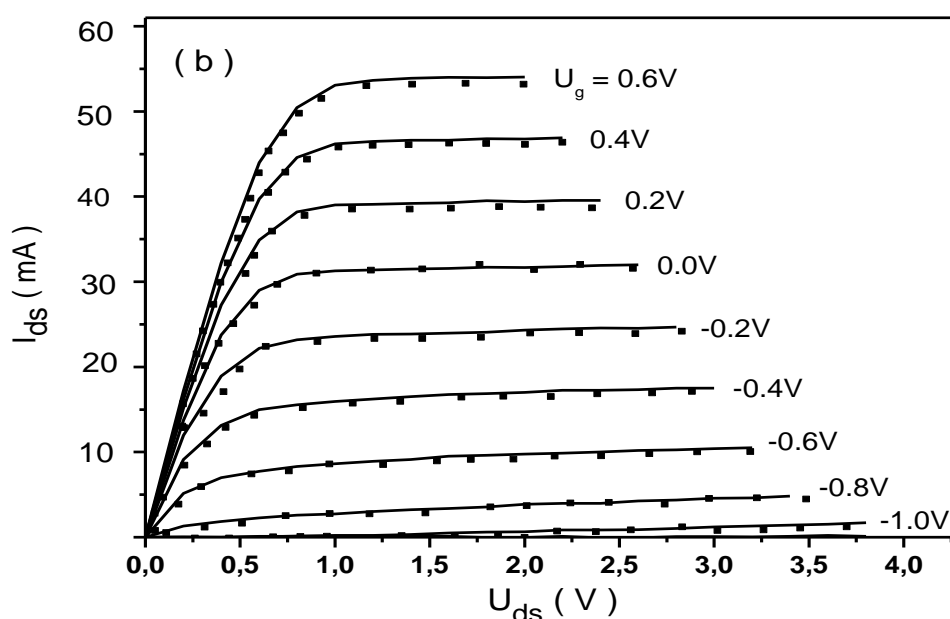


Рис. 1.

На следующем этапе методами численного моделирования исследовалось влияние конструктивно-топологических параметров на выходные характеристики транзисторов. Для базовой конструкции эпитаксиальной гетероструктуры обнаружено сильное влияние глубины травления и формы затворной канавки, а также пространственного расположения затворного электрода в канавке на статические ВАХ. На рис.2 представлена расчетная зависимость порогового напряжения U_{th} при напряжении сток-исток U_{ds} равном 2В от глубины травления затворной канавки h , рассчитанные для рНЕМТ-транзистора с длиной затворного электрода 0,3 мкм. Сравнительно небольшие (± 2 нм) отклонения глубины травления от проектного значения 84 нм, лежащие в пределах точности используемых технологических процессов, приводят к существенному (около 15%) изменению порогового напряжения транзистора.

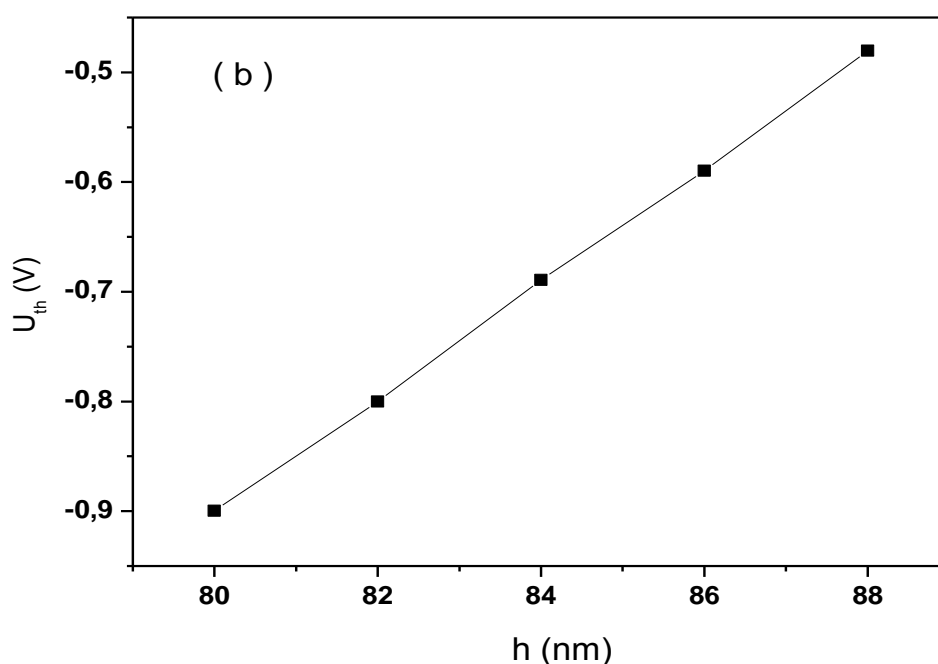


Рис. 2.

Для экспериментального подтверждения выводов о высокой чувствительности базовой конструкции к глубине травления были изготовлены образцы тестовых гетероструктур, воспроизводящие базовую конструкцию за исключением контактного слоя сильно легированного n-GaAs. Толщина контактного слоя для образца #1 составляла 10 нм, а в образце #2 он полностью отсутствовал. Отдельные части тестовых гетероструктур подвергались медленному химическому травлению, после чего на поверхности всех образцов были сформированы тестовые диодные структуры с барьером Шоттки диаметром 100 мкм и выполнены измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) на частоте 1 МГц с использованием RLC-моста. На рис.3 представлены измеренные ВФХ для отдельных частей двух тестовых образцов. Кривые 1,2 соответствуют исходным структурам, кривые 1а, 2а – структурам 1 и 2,

подвергнутым травлению в одном процессе на расчетную глубину 10 нм, а кривая 1b - структуре 1, подвергнутой дополнительному травлению на ту же расчетную глубину 10 нм. Поскольку после первого шага травления напряжение отсечки для структуры 1 по абсолютному значению меньше, чем исходное значение напряжения отсечки для структуры 2 (кривые 1a и 2), реальная глубина травления на первом шаге превысила проектное значение 10 нм, соответствующее толщине контактного слоя. В то же время, после второго шага травления напряжение отсечки для структуры 1 по абсолютному значению больше, чем для структуры 2 после первого шага травления (кривые 1b и 2a). Это означает, что реальная глубина травления на втором шаге существенно меньше проектного значения 10 нм.

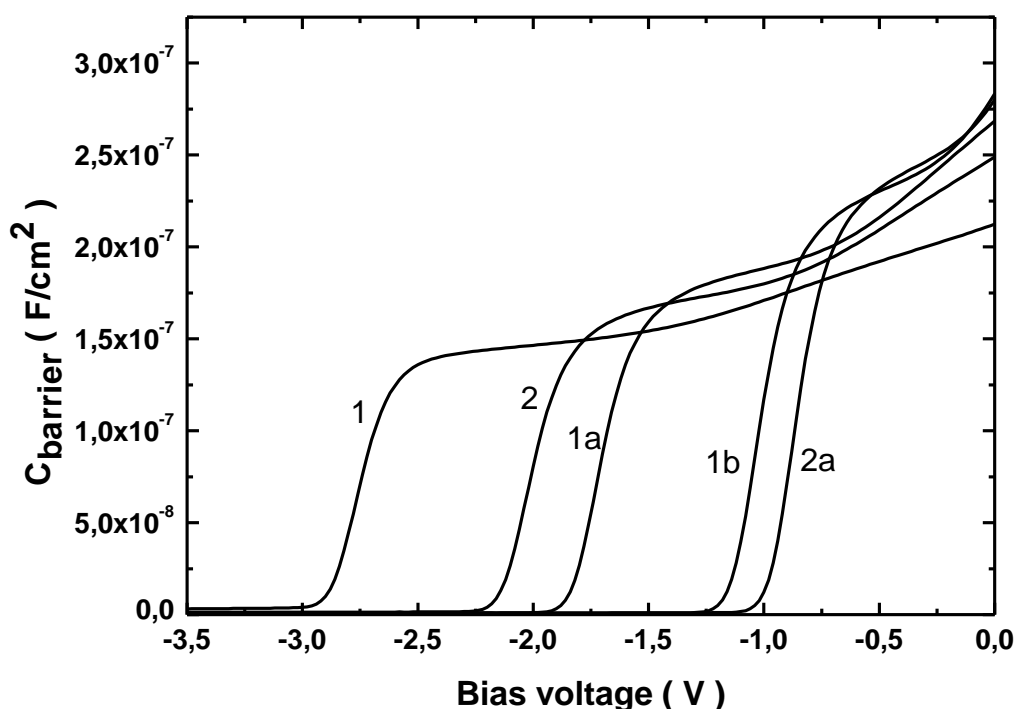


Рис. 3.

Приведенные результаты подтверждают высокую чувствительность порогового напряжения к изменению глубины расположения барьерного электрода в пределах нескольких нанометров и сложность обеспечения контролируемого травления затворной канавки с требуемой точностью.

Возможным способом решения проблемы является введение в конструкцию эпитаксиальной гетероструктуры тонких слоев AlGaAs с высоким содержанием Al, которые могут использоваться в качестве стоп-слоев при селективном химическом травлении [5]. Помимо кардинального улучшения воспроизводимости и однородности параметров рНЕМТ-транзисторов, использование селективного травления позволяет существенно улучшить морфологию поверхности затворной канавки. Исследования области канала транзисторных структур методом атомно-силовой микроскопии показали, что характерная шероховатость поверхности затворной канавки при

использовании базовой конструкции транзисторной гетероструктуры и стандартной процедуры травления составляет 2-3 нм, тогда как при использовании гетероструктур со стоп-слоями и процедуры селективного травления шероховатость не превышает 0,5 нм.

Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о возможности эффективного использования современных пакетов численного моделирования для анализа субмикронных структур СВЧ рНЕМТ транзисторов с учетом основных физических явлений и особенностей реальных приборных конструкций. Показано, что стандартная процедура химического травления затворной канавки не позволяет обеспечить требуемую точность для базовой конструкции транзисторной гетероструктуры. Оптимизированные транзисторные гетероструктуры в системе материалов AlGaAs-InGaAs-GaAs с расположенными на оптимальной глубине технологическими стоп-слоями AlGaAs, обеспечивают прецизионное и однородное травление затворной канавки, существенное улучшение морфологии поверхности и получение стабильных приборных характеристик МИС для модулей АФАР.

Работа выполнялась при частичной поддержке Программы №27 Президиума РАН и гранта РФФИ 09-02-13600-офи_ц.

Библиографический список

1. M. Malmkvist, S. Wang, J.V. Grahn, IEEE Trans. Electron Devices, 55, 268 (2008)
2. H. Brech, T. Grave, T. Simlinger, S. Selberherr, IEEE Trans. Electron Devices, 44, 1822 (1998)
3. V. Palankovski, R. Quay, S. Selberherr, IEEE J. Solid-State Circuits, 36, 1365 (2001)
4. SILVACO International, ATLAS user's manual. DEVICE SIMULATION SOFTWARE, Santa Clara, CA, 2008
5. Н.А.Малеев, А.Г.Кузьменков, В.С.Михрин, А.П.Васильев, М.М.Кулагина, В.А.Зелюкина, В.Е.Земляков, А.С.Шуленков, Гетероструктуры полевых транзисторов для реализации многофункциональных МИС СВЧ на базе технологии селективного химического травления, XV Координационный научно-технический семинар по СВЧ технике, 4-6 сентября 2007 г., Нижегородская область, п.Хахалы, сс.65-67