

В.Г. Тихомиров¹, Н.А. Малеев², В.Б. Янкевич¹

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

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

Численное моделирование влияния физико-топологических особенностей затворной области на статические характеристики полевых СВЧ-транзисторов для МИС модулей АФАР

Приведены некоторые результаты численного моделирования 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 так же 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. 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 следующем этапе методами численного моделирования исследовалось влияние конструктивно-топологических параметров на выходные характеристики транзисторов. Для базовой конструкции эпитаксиальной гетероструктуры обнаружено сильное влияние глубины травления затворной канавки (см. рис.1), а также пространственного расположения затворного электрода в канавке на статические характеристики. В частности, изменение глубины расположения затворного электрода всего на 4 нм, что вполне соответствует возможному разбросу при использовании стандартной процедуры химического травления затворной канавки, приводит к изменению порогового напряжения более чем на 20 процентов. Такая резкая зависимость от неконтролируемых флуктуаций параметров одной из базовых технологической операций может приводить к невозможности изготовить большую партию МИС с требуемой стабильностью параметров.

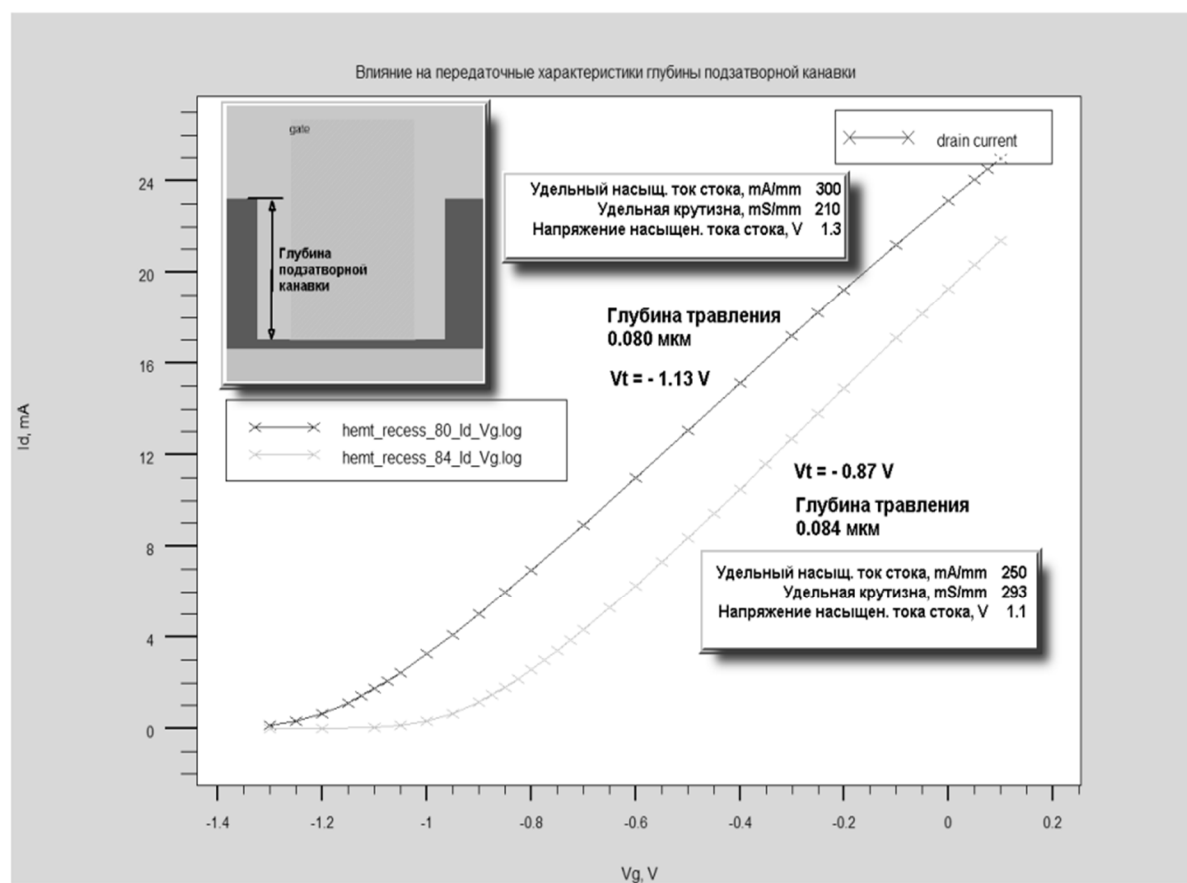


Рисунок 1

Этот, показанный в результате компьютерного эксперимента факт, позволил объяснить наблюдаемый в больших партиях транзисторов достаточно большой разброс тока стока, как показано на рис.2 горизонтальной штриховкой столбцов диаграммы.

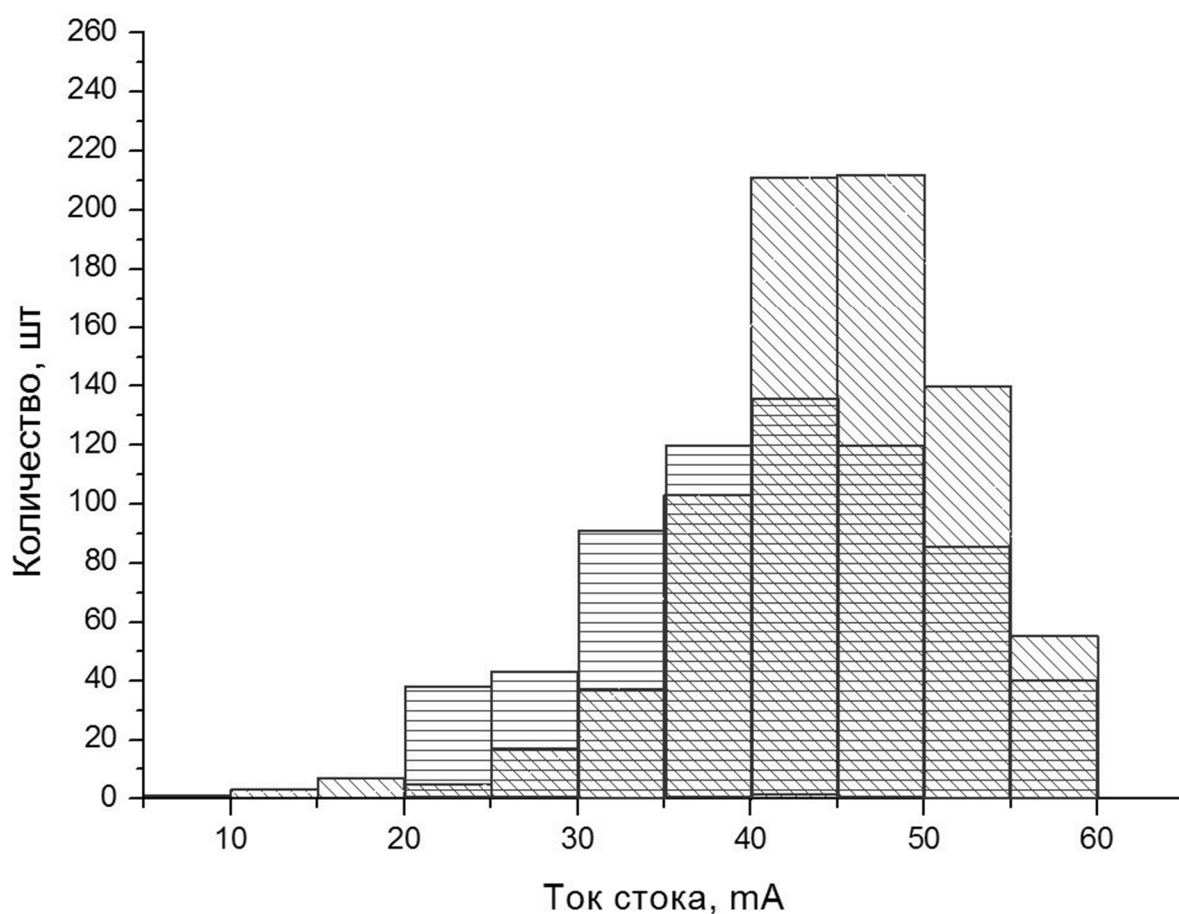


Рисунок 2

Приведенные результаты подтверждают высокую чувствительность порогового напряжения к изменению глубины расположения затвора 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 существенного улучшения воспроизводимости и стабильности статических параметров рНЕМТ-транзисторов (как, например, показано на рис.2 наклонной штриховкой), 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 pHEMT 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.

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