

Исследование влияния параметров затворной области на статические характеристики полевых СВЧ-транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs–InGaAs–GaAs

© 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*

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
197376 Санкт-Петербург, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] ООО Коннектор Оптик,
194021 Санкт-Петербург, Россия

• Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий
Российской академии наук,
195220 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Научно-производственное предприятие «Исток»,
141190 Фрязино, Россия

(Получена 15 февраля 2011 г. Принята к печати 25 февраля 2011 г.)

Рассмотрены результаты численного моделирования и экспериментального исследования влияния параметров затворной области на статические характеристики полевых СВЧ-транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs–InGaAs–GaAs (*p*-HEMT). Продемонстрирована возможность корректного моделирования статических характеристик реальных приборных конструкций *p*-HEMT-транзисторов с использованием программного пакета TCAD фирмы SILVACO. Показана принципиальная необходимость использования селективного травления затворной канавки для контролируемого и воспроизводимого получения требуемых приборных характеристик.

Современные гетероструктурные полевые СВЧ-транзисторы представляют собой сложную конструкцию на основе многослойных наноразмерных гетероструктур с субмикронными топологическими размерами. Изготовление и диагностика таких приборных структур возможны только с применением самых современных технологических и аналитических методов, обеспечивающих возможность управляемого синтеза сверхтонких (единицы–десятки нм) эпитаксиальных слоев со сложными профилями состава и легирования, 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].

Альтернативный подход состоит в использовании методов математического моделирования, базирующихся на многомерных (2D или 3D) численных методах расчета транспорта носителей, тепловых процессов и динамических характеристик [2]. Такие возможности предоставляют современные пакеты численного моделирования полупроводниковых приборов [3]. Однако оптимальный выбор и эффективное использование того или иного программного обеспечения возможны только после верификации его возможностей для решения определенного класса задач, что требует тщательной настройки параметров используемых моделей с учетом

свойств конкретного объекта моделирования, в том числе особенностей используемой технологии.

Наибольшее влияние на характеристики гетероструктурных полевых транзисторов оказывают параметры затворной области (толщины, состав и профиль легирования отдельных слоев транзисторной гетероструктуры, геометрические размеры и профиль затворной канавки, топологические размеры и пространственное расположение затворного электрода). Выбор оптимальных параметров затворной области 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.

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 (*p*-HEMT-транзисторы).

В качестве инструмента для моделирования и расчетной оптимизации *p*-HEMT-транзисторов использовался лицензионный программный пакет для численного моделирования полупроводниковых приборов TCAD фирмы SILVACO [4]. 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].

[†] E-mail: maleev@beam.ioffe.ru

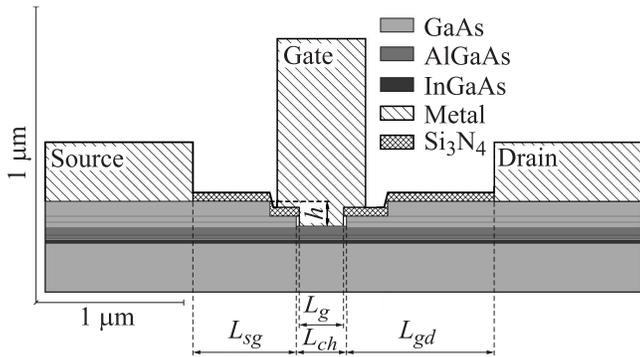


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения моделируемой области исследуемых p -HEMT-транзисторов.

На рис. 1 приведено схематическое изображение поперечного сечения моделируемой области исследуемых p -HEMT-транзисторов. Для корректного расчета характеристик реальных транзисторов сперва необходимо выбрать адекватный набор математических моделей из предлагаемого в выбранном пакете программы набора, а затем выполнить адаптацию параметров математических моделей (калибровку моделей). Для калибровки параметров моделей, помимо измеренных статических характеристик тестовых транзисторов с относительно длинным затворным электродом (длина затвора 0.9 мкм), 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 (длина затвора L_g , длина затворной канавки L_{ch} , расстояния исток-затвор L_{sg} и затвор-сток L_{gd} , глубина травления затворной канавки h), измеренные с помощью растровой электронной микроскопии [6]. Необходимость точного, с погрешностью единицы процентов, описания экспериментальных 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 p -HEMT-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 с относительно длинным затворным электродом (около 0.9 мкм)

и корректного предсказания его поведения в случае изменения каких-либо физико-топологических параметров (длины затвора, глубины затворной канавки и др.).

На рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные зависимости тока сток-исток I_{ds} от напряжения сток-исток U_{ds} при разных значениях напряжения затвор-исток U_{gs} для двух вариантов p -HEMT-транзисторов, изготовленных из номинально идентичных эпитаксиальных гетероструктур, но существенно отличающихся длиной затворного электрода, расстоянием между контактами и глубиной травления затворной канавки. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных вольт-амперных характеристик, наблюдаемое для двух различных транзисторных структур, служит подтверждением адекватности построенной модели транзистора.

На следующем этапе методами численного моделирования исследовалось влияние конструктивно-топологических параметров на выходные характеристики

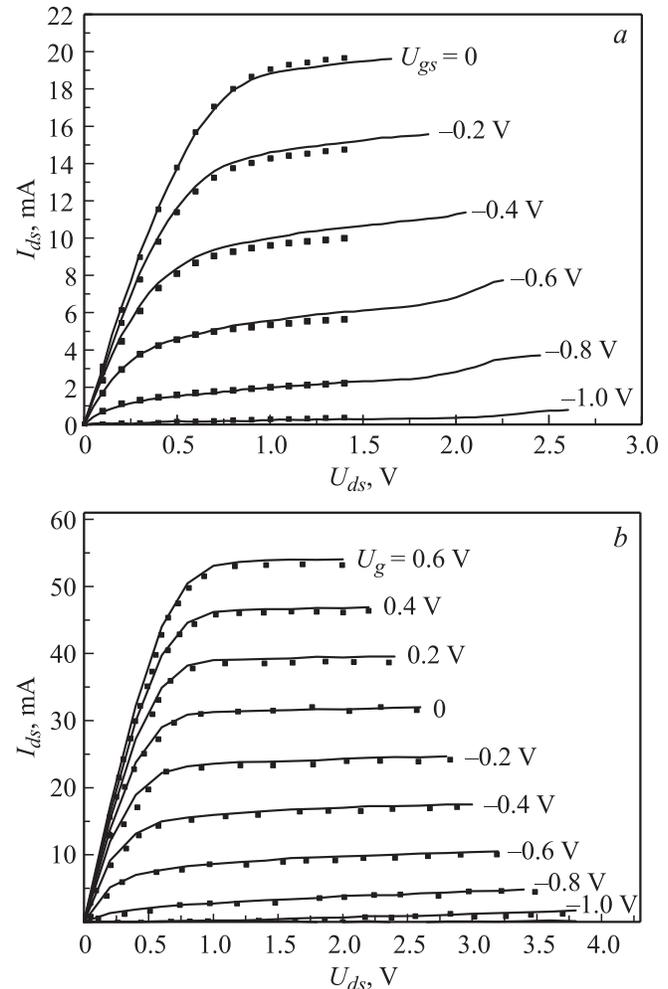


Рис. 2. Экспериментальные (сплошные кривые) и расчетные вольт-амперные характеристики сток-исток для двух вариантов p -HEMT-транзисторов: a — длина затвора 0.9 мкм, расстояние сток-исток 3.5 мкм, глубина затворной канавки 80 нм; b — длина затвора 0.3 мкм, расстояние сток-исток 2.5 мкм, глубина затворной канавки 84 нм.

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 [7]. На рис. 3 представлены расчетные зависимости тока насыщения сток-исток $I_{ds,sat}$ при напряжении U_{ds} , равном 2 В, и порогового напряжения U_{th} от глубины травления затворной канавки h , рассчитанные для p -НЕМТ-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 и заметному (около 5%) изменению тока насыщения транзистора.

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

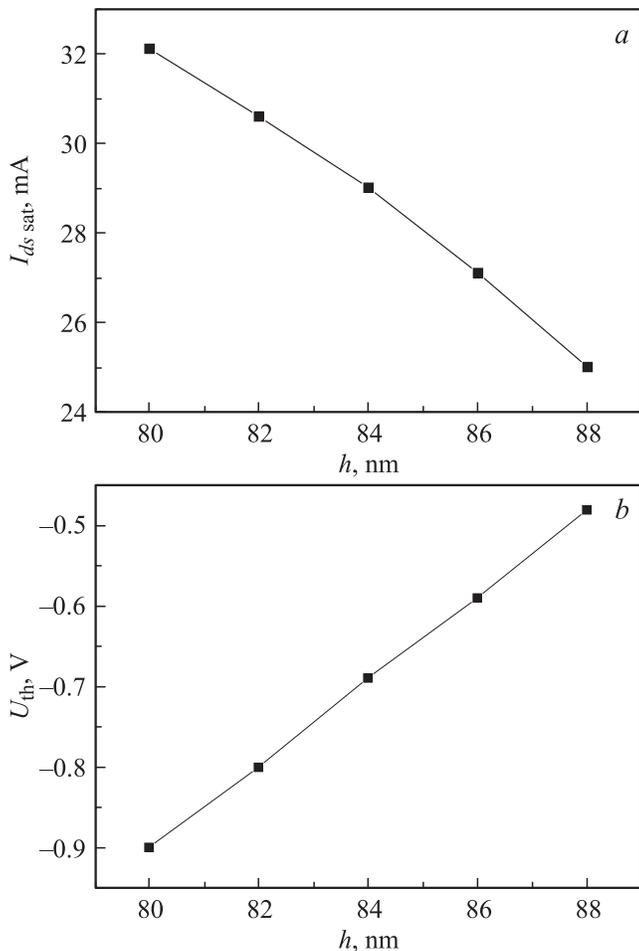


Рис. 3. Расчетные зависимости тока насыщения (а) и порогового напряжения (б) p -НЕМТ-транзисторов с длиной затвора 0.3 мкм от глубины травления затворной канавки.

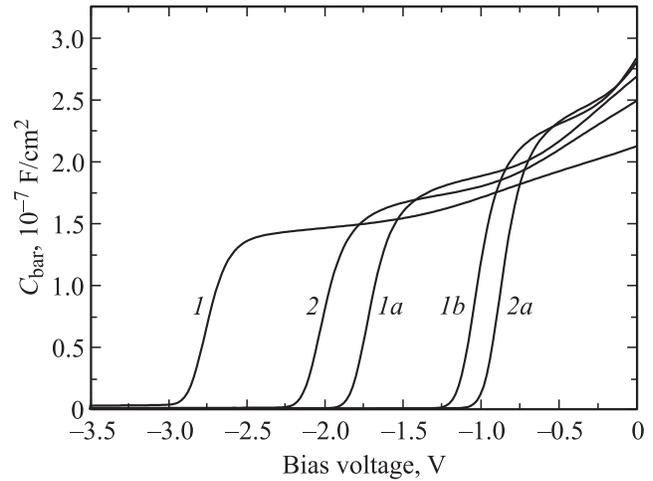


Рис. 4. Экспериментальные вольт-фарадные характеристики для отдельных частей двух тестовых образцов: 1, 2 — исходные структуры; 1, а, 2, а — структуры 1 и 2, подвергнутые травлению на номинальную глубину 10 нм; 1, б — структура 1, подвергнутая дополнительному травлению на глубину 10 нм.

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 Agilent E4980A. На рис. 4 представлены измеренные ВФХ для отдельных частей двух тестовых образцов. Кривые 1, 2 соответствуют исходным структурам, кривые 1, а, 2, а — структурам 1 и 2, подвергнутым травлению в одном процессе на расчетную глубину 10 нм, а кривая 1, б — 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 1, а 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 1, б и 2, а). Это означает, что реальная глубина травления на втором шаге существенно меньше проектного значения 10 нм. Приведенные результаты подтверждают высокую чувствительность порогового напряжения к изменению глубины расположения барьерного электрода в пределах нескольких нм 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 [8]. Помимо кардинального улучшения воспроизводимости и однородности параметров p -НЕМТ-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 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.

Существенный интерес 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 сложной задачей [9]. На рис. 5, *a* представлена типичная вольт-амперная характеристика диода затвор–сток, измеренная для изготовленного p -НЕМТ-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 6 В наблюдается плавное нарастание тока вплоть до обратного напряжения около 13 В, после чего обратный ток затворного диода начинает резко возрастать. 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 характеристик p -НЕМТ-транзисторов в режиме пробоя потребовалось построение полной модели энергетического баланса [10], с учетом разогрева носителей, эффектов насыщения скорости, неполной ионизации и генерации носителей в области сильных полей [11]. На рис. 5, *b* представлены результаты расчетов вольт-амперных характеристик сток–исток при напряжении на затворе -1.2 В, близком к пороговому. Расчеты выполнялись для двух p -НЕМТ-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 (15–25 В) 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.

Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о возможности эффективного использования современных пакетов численного моделирования для анализа субмикронных структур СВЧ p -НЕМТ-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, а также существенное улучшение морфологии поверхности.

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

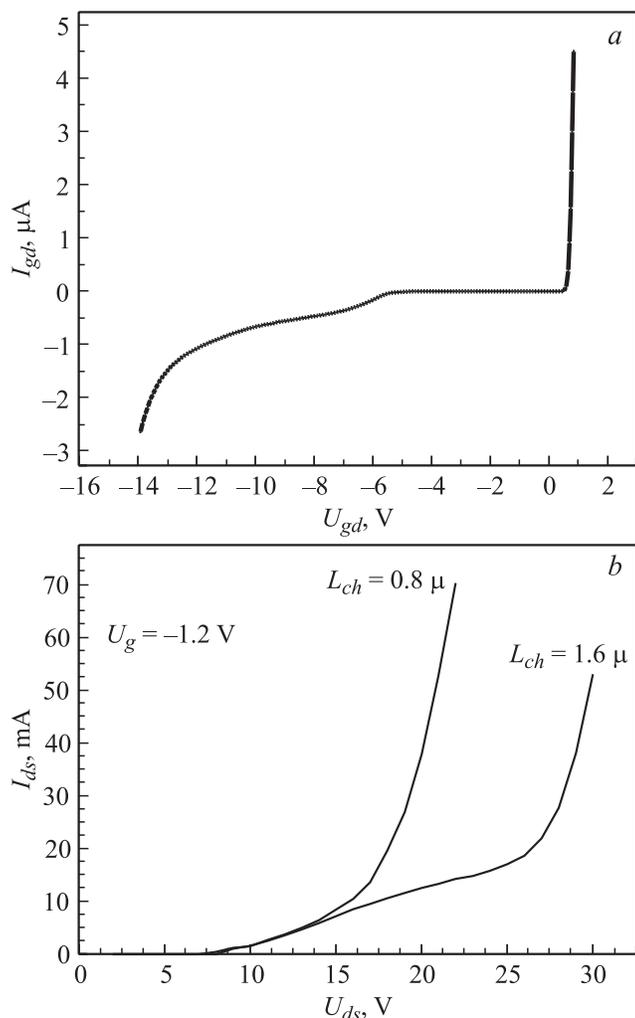


Рис. 5. *a* — экспериментальная вольт-фарадная характеристика диода затвор–сток для изготовленного p -НЕМТ-транзистора; *b* — расчетные вольт-амперные характеристики сток–исток в режиме пробоя при разной ширине затворной канавки.

Список литературы

- [1] M. Malmkvist, S. Wang, J.V. Grahn. IEEE Trans. Electron. Dev., **55**, 268 (2008).
- [2] H. Brech, T. Grave, T. Simlinger, S. Selberherr. IEEE Trans. Electron. Dev., **44**, 1822 (1998).
- [3] V. Palankovski, R. Quay, S. Selberherr. IEEE J. Sol. St. Circuits, **36**, 1365 (2001).
- [4] SILVACO International, ATLAS user's manual. DEVICE SIMULATION SOFTWARE (Santa Clara, CA, 2008).
- [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. *Proc. 15 Int. Conf. Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2005)* (Sevastopol, Crimea, Ukraine, Sept. 12–16, 2005).
- [6] Е.Ю. Днестранская, К.В. Дудинов, В.Г. Тихомиров, А.М. Емельянов, А.Ю. Городецкий. *Матер. IX Всеросс. науч.-техн. конф. „Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА“* (Звенигород, Московская обл., 1–3 декабря 2010).
- [7] В.Г. Тихомиров, Н.А. Малеев, В.Б. Янкевич, В.М. Устинов. *Матер. XVI координац. науч.-техн. сем. по СВЧ технике* (пос. Хахалы, Нижегородская область, 8–10 сентября 2009) с. 67.
- [8] Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, В.С. Михрин, А.П. Васильев, М.М. Кулагина, В.А. Зелюкина, В.Е. Земляков, А.С. Шуленков. *Матер. XV координац. науч.-техн. сем. по СВЧ технике* (пос. Хахалы, Нижегородская область, 4–6 сентября 2007) с. 65.
- [9] R. Menozzi. IEEE Trans. Dev. and Mater. Reliability, **4**, 54 (2004).
- [10] B. Meinerzhagen, W.L. Engl. IEEE Trans. Electron. Dev., **35**, 689 (1988).
- [11] S. Selberherr. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices* (Wien, N.Y., Springer-Verlag, 1984).

Редактор Л.В. Беляков

Theoretical and experimental investigation of the gate region effects on AlGaAs–InGaAs *p*-HEMTs static characteristics

V.G. Tikhomirov, N.A. Maleev*†, A.G. Kuzmenkov†*, Yu.V. Solov'ev*, A.G. Gladyshev†•, M.M. Kulagina*, V.E. Zemlyakov‡, K.V. Dudinov‡, V.B. Yankevich, A.V. Bobyl*, V.M. Ustinov*

Saint Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia

* Ioffe Physicotechnical Institute,

Russian Academy of Sciences,

194021 St. Petersburg, Russia

† Ltd. „Connector Optics“,

194242 St. Petersburg, Russia

• St. Petersburg Academic University —

Nanotechnology Research and Education Center,

Russian Academy of Sciences,

195220 St. Petersburg, Russia

‡ Research Technological Company „Istok“,

141190 Fryazino, Russia

Abstract Effects of the gate region on AlGaAs–InGaAs *p*-HEMTs static characteristics were investigated using numerical modeling and experimental procedures. Realistic submicron *p*-HEMT device structures can be successfully modeled with Silvaco TCAD software. Using of the selective gate-recess etching procedure is necessary to provides controllable and reproducible device fabrication process.