

**В.Г. Тихомиров^{1,2}, А.Г. Гладышев², Н.А. Малеев²,
А.Г. Кузьменков², А.П. Васильев², В.М. Устинов²**

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

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

Выбор численных моделей для оптимизации структур ГБТ СВЧ транзисторов с субмикронной толщиной базы в системе материалов InAlAs/InGaAs на подложках InP

Приведены некоторые результаты численного моделирования и экспериментального исследования гетероструктурных биполярных СВЧ транзисторов с субмикронной толщиной базы в системе материалов InAlAs/InGaAs на подложках InP. Продемонстрирована возможность корректного моделирования отдельных статических характеристик простых приборных конструкций.

Ключевые слова: численное моделирование, гетероструктурные биполярные СВЧ транзисторы

Для оптимального выбора базовой конструкции гетеробиполярных СВЧ-транзисторов требуется не только глубокое знание существующих решений в этой области и экспериментальные подтверждения их эффективности, но и проведение анализа такой конструкции методами численного моделирования. Поскольку используемые для этой цели численные модели должны обеспечивать расчет двумерных распределений основных физических величин (потенциала, электрического поля, концентрации электронов и дырок) в сечении прибора, а также принципиальную возможность расчета статических вольт-амперных характеристик гетероструктурных биполярных СВЧ транзисторов с субмикронной толщиной базы в системе материалов InAlAs/InGaAs на подложках InP, требовалось провести анализ доступных современных реализаций технологического численного моделирования полупроводниковых приборов.

Шире всего на сегодняшний день используются разновидности метода конечных элементов. Покрывая расчетную область сеткой конечных элементов, задавая профили концентрации в каждом слое, градиент состава с учетом моделей, применимых к конкретному прибору, моделируются его приборные характеристики. Согласно известным рекомендациям [1,2] для моделирования гетеробиполярного транзистора может настраиваться весьма сложная гидродинамическая модель транспорта с уравнением баланса энергии электронов, включенным в уравнения переноса. В такую численную модель можно заложить учет температуры носителей тока в структуре, уравнение для теплового потока, наряду с уравнениями Пуассона и непрерывности. Таким образом, эта модель может позволить учесть перенос энергии через гетероинтерфейсы, играющий важную роль в данных структурах. Легирование и

эффект насыщения подвижности в сильных электрических полях учитывался при расчете подвижности как электронов, так и дырок. Также в расчеты включены другие модели: распределение Ферми-Дирака (применимое к фермионам), учет термоэлектронной эмиссии для обоих типов заряда на гетероинтерфейсах, механизмы рекомбинации - Шоккли-Рида-Холла, Оже-рекомбинации, излучательной рекомбинации. Также расчет может учитывать процессы туннелирования через потенциальные барьеры, однако в случае малой высоты барьера или достаточно большой толщины барьера туннелирование электронов можно опустить из рассмотрения. С увеличением разности потенциалов между коллектором и эмиттером возрастает диссипация энергии в структуре, происходит разогрев в области переходов. Таким образом, может возникнуть необходимость учета эффекта саморазогрева структуры, что потребует решения термодинамических уравнений одновременно с гидродинамическими.

Поскольку численный расчет решеточно-согласованной по InP структуры ГБТ имеет определенную сложность, представляется разумным проведение численного моделирования для структур ГБТ на более изученных материалах. С этой целью, для проверки применимости некоторых из вышеперечисленных численных моделей, был проведен расчет упрощенной конструкции ГБТ на основе системы материалов GaAs/AlGaAs.

Для первого приближения в модели были приняты следующие упрощения:

- в эмиттерном контактном слое не использовался метаморфный слой InGaAs;
- градиентные по химическому составу слои были заменены слоями со ступенчатым изменением профиля состава;
- при описании прибора меза эмиттерного контакта описывалась в прямоугольной геометрии, меза межэлементной изоляции отсутствовала;
- не учитывались контактные сопротивления.

В результате принятых упрощений была сформирована структура, приведенная на рис.1, где показано ее сечение на экране монитора.

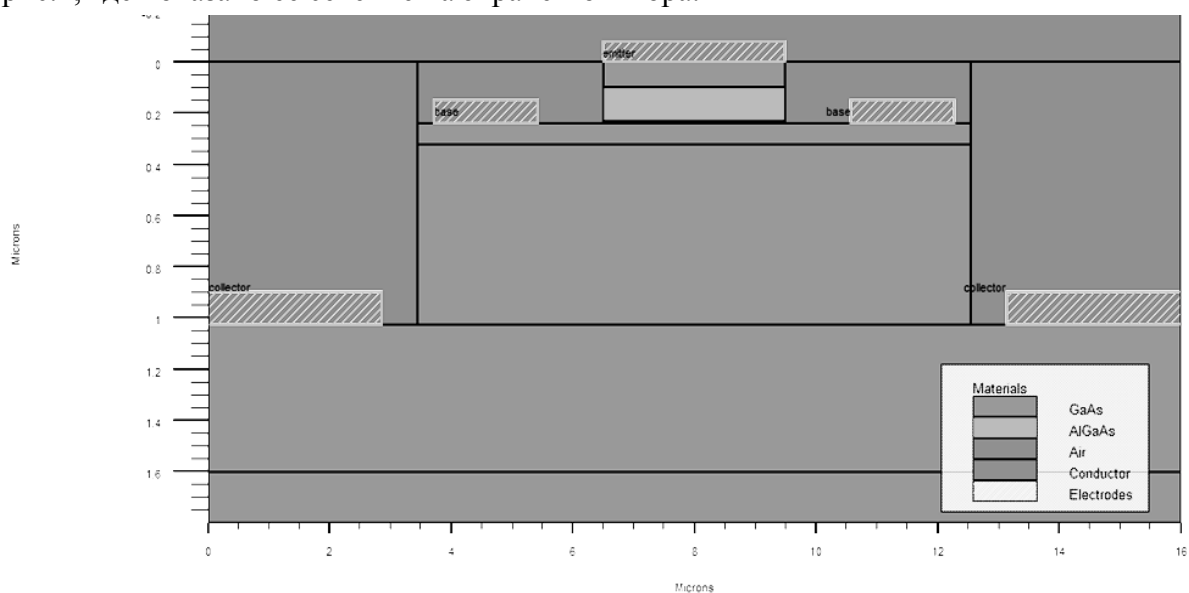


Рис. 1.

После завершения процесса описания структурных и приборных особенностей исследуемого объекта было проведено моделирование его характеристик, включая распределение тока, потенциала и расчет выходных коллекторных характеристик при заданном уровне тока базы (1 мА).

Распределение плотности тока по структуре ГБТ при смещении 1.4 В на экране монитора показано на рис.2. Как видно из рисунка, высокая плотность тока существует под эмиттерным контактом. В то же время, у базового и коллекторного контактов плотность тока высока только в небольшой части, ближайшей к середине структуры. Это указывает на то, что при дальнейшем усовершенствовании модели следует учесть уменьшение эффективной площади данных контактов, которое должно приводить к сильному возрастанию контактного сопротивления.

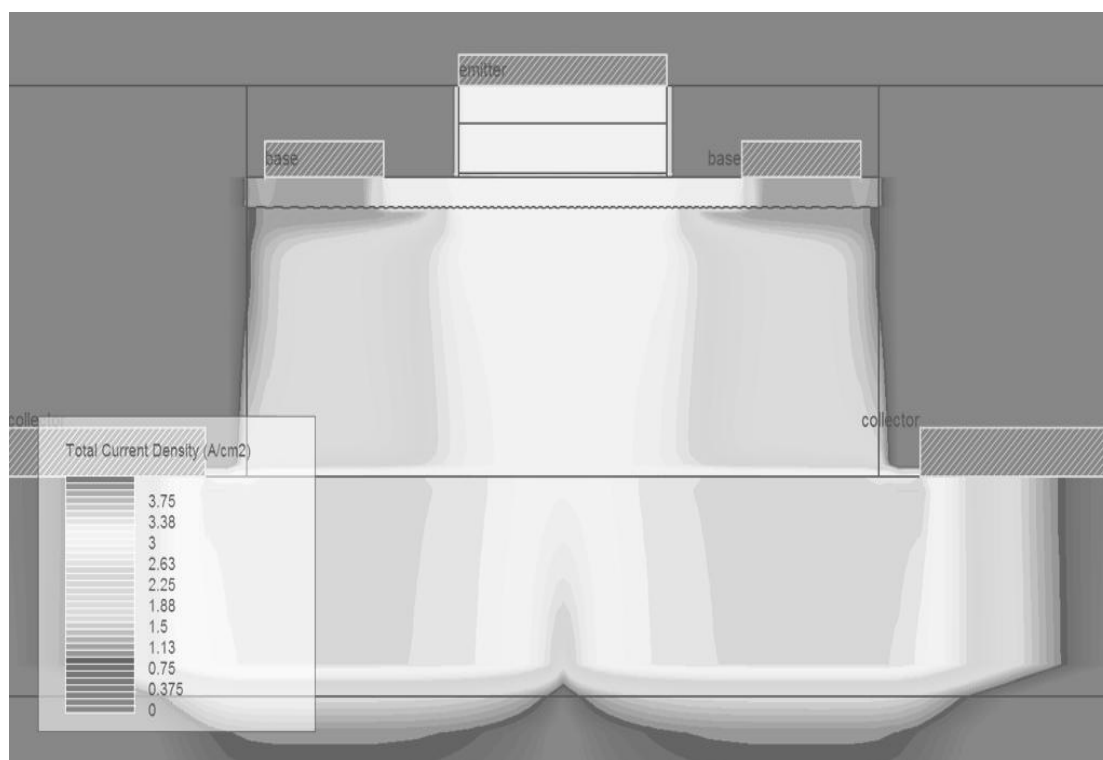


Рис.2.

На рис.3 приведены выходные коллекторные характеристики, полученные экспериментально и рассчитанные с помощью исследуемых реализаций численного моделирования. Полученная зависимость, учитывая принятые упрощения, с хорошей точностью соответствует экспериментальной кривой.

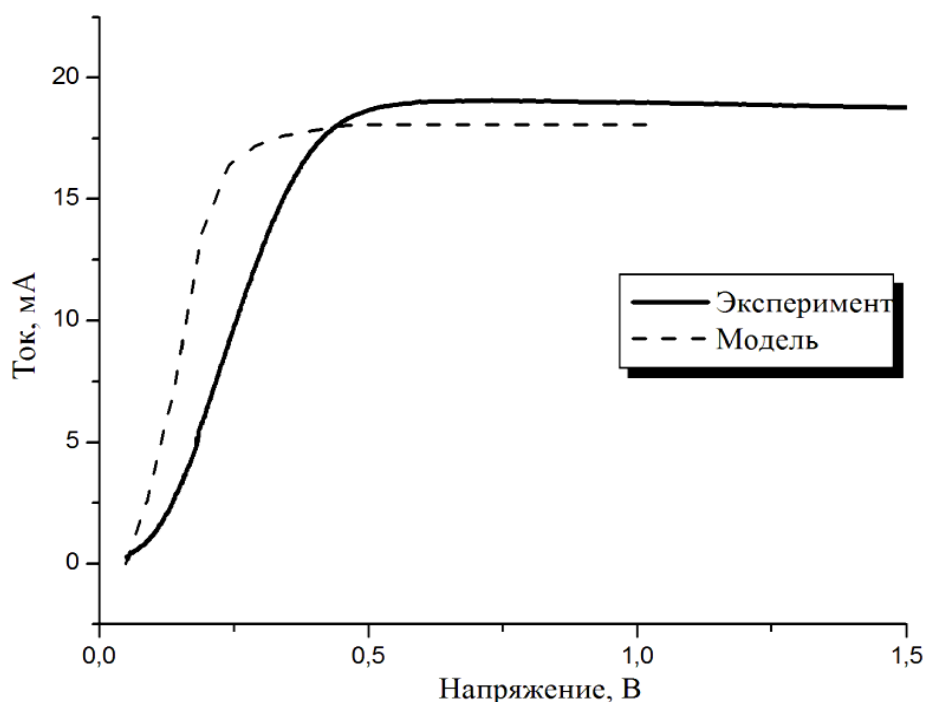


Рис.3.

Видно, что получено совпадение характера зависимости, имеющей насыщение при больших напряжениях, практически одинаково значение тока насыщения выходных характеристик, невелика разница в крутизне характеристик. Все это говорит о правильности описания объекта моделирования и выборе используемых моделей и эффектов, а также о применимости выбранных реализаций численных моделей для получения выходных характеристик ГБТ и оптимизации их конструкций.

В соответствии с принятой методикой выбора реализаций численных моделей, далее был проведен численный расчет решеточно-согласованной по InP структуры ГБТ, которая имеет повышенную сложность. В результате принятых упрощений, которые аналогичны первой модельной задаче, была определена простая тестовая структура. При построении для нее численной модели были использованы некоторые новые подходы и учтены особенности численного моделирования современных структур ГБТ, реализованные в ведущих пакетах приборно-технологического моделирования. Так, модели подвижности и рекомбинации выбраны в соответствии с работами [1,2], особое внимание уделено областям в ГБТ с сильным легированием, как показано в работе [3]. Поскольку проектируемый прибор должен обеспечивать достаточно большую мощность (порядка 1Вт), были учтены рекомендации и выводы, сформулированные в работе [4].

Одним из интересных и важных параметров конструкции ГБТ, требующих очевидной оптимизации, является положение, состав и толщина нелегированного слоя «спейсера» в районе перехода эмиттер-база. По результатам проведенного моделирования можно расположить этот слой оптимальным для данной конструкции

образом, что приведет к существенному повышению эффективности эмиттера и благоприятно скажется на выходных характеристиках транзистора. На рис.4, для примера, показано двухмерное распределение концентрации дырок (слева) в области перехода эмиттер-база в логарифмическом масштабе и состав материалов (справа) в этой области на экране монитора.

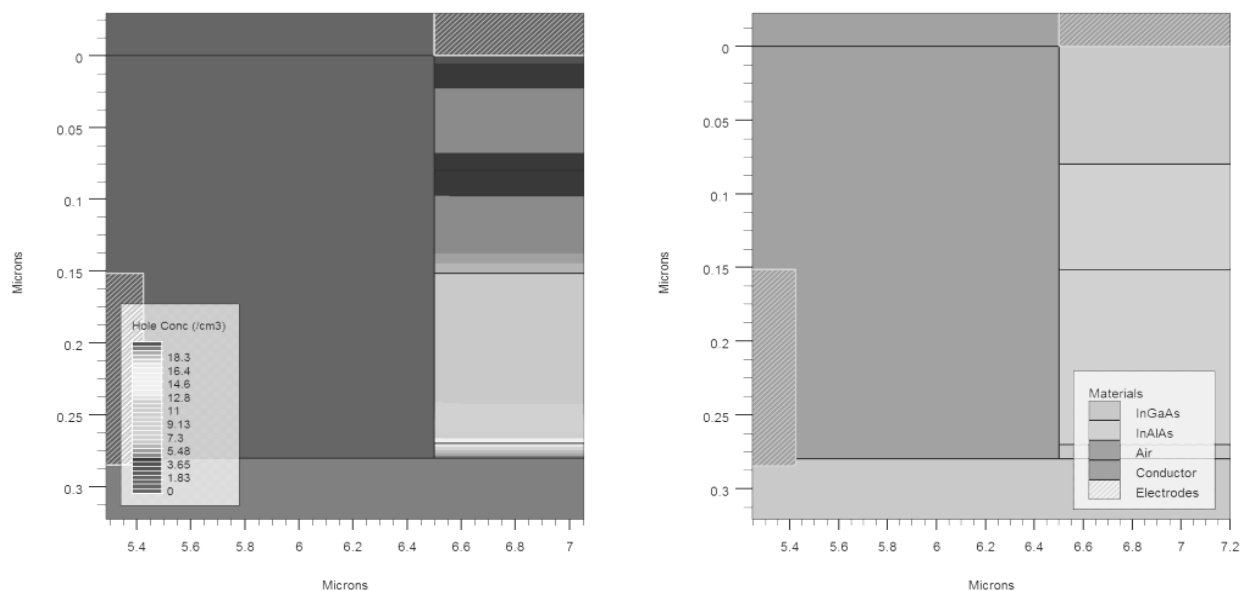


Рис.4.

Предварительный анализ полученных результатов, говорит о принципиальной применимости полученного описания объекта моделирования и выбора используемых физических моделей, а также о возможных перспективах применения выбранных реализаций численных моделей СВЧ ГБТ для оптимизации его конструкции.

Работа выполнялась при поддержке проекта РФФИ 11-02-12239-офи_м и Федеральной целевой программы «Научные и педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013, Госконтракт 14.740.11.0066.

Библиографический список

1. Klaassen, D.B.M., "Physical Modeling Bipolar Device Simulation", In: Simulation of Semiconductor Devices and Processes Vol. 4, ed. W. Fichtner and D. Aemmer (Harting-Gorre, 1991), 23-43.
2. Klaassen, D.B.M., "A Unified Mobility Model for Device Simulation - II. Temperature Dependence of Carrier Mobility and Lifetime", Solid-State Elect. Vol. 35, No. 7 (1992): 961-967.
3. Klausmeier-Brown, M., M. Lundstrom, M. Melloch, "The Effects of Heavy Impurity Doping on AlGaAs/GaAs Bipolar Transistors", IEEE Trans. Electron Devices Vol. 36, No. 10 (1989): 2146-2155.
4. Palankovski, V., Schultheis, R. and Selberherr, S., "Simulation of Power Heterojunction Bipolar Transistors on Gallium Arsenide", IEEE Trans. on Elec. Dev., Vol. 48, No. 6, 6 (June 2001): 1264-1269