

ной пленки и энергии легирования базы, что приводит к заметному изменению $U_{кб}$ (рис. 3).

Таким образом, показано, что на пробивное напряжение коллектор-база определяющее влияние оказывает не только уровень легирования, но и профиль распределения бора по толщине базовой области $p-n$ -переход и фосфора по толщине эпитаксиальной пленки. Эти особенности необходимо учитывать при проектировании конструкций базовых элементов биполярных субмикронных БИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Адамов Ю. Ф.* Конструктивные элементы сверхбыстродействующих биполярных БИС // *Зарубежная электронная техника*. 1984. № 11. С. 28–59.
2. *Красников Г. Я.* Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера. 2002. С. 416.
3. *Степаненко И. П.* Основы микроэлектроники. М.: Советское радио, 1980. С. 424.
4. *Пилипенко В. А., Пономарь В. Н., Горушко В. А.* Управление свойствами тонкопленочных систем с применением импульсной фотонной обработки // *Инженерно-физический журнал*. 2003. Т. 76. № 4. С. 95–98.
5. *Пилипенко В. А.* Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск: Изд. центр БГУ, 2004. С. 531.
6. *Анищик В. М., Пилипенко В. А.* Физические основы быстрой термообработки. Геттерирование, отжиг ионнолегированных слоев, БТО в технологии СБИС. Минск: БГУ, 2001. С. 149.
7. *Зи С.* Физика полупроводников. М.: Мир. 1984. Т. 1. С. 405.
8. *Van Overstraten, De Man H.* Measurement of the ionization rates in diffusion silicon $p-n$ -junctions // *Sol. St. Electron.* – 1970. Vol. 13. № 5. P. 583–608.
9. *Пилипенко В. А., Вечер Д. В., Горушко В. А.* и др. Моделирование параметров биполярных транзисторов // *Инженерно-физический журнал*. 2007. Т. 80. № 3. С. 181–187.

СОГЛАСОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ДВУХЗОННОЙ МОДЕЛИ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

И. И. Абрамов, И. А. Гончаренко, И. В. Коломейцева

*Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, nanodev@bsuir.edu.by*

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приборов, подтверждающим огромные потенциальные возможности твердотельной наноэлектроники, является резонансно-туннельный диод (РТД). Серьезная проблема при его разработке и исследовании связана с недостаточной адекватностью большинства известных моделей различных формализмов [1].

В данной работе проиллюстрирована адекватность предложенной комбинированной двухзонной модели РТД путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Проанализировано влияние поперечного волнового вектора на результаты расчета вольт-амперных характеристик (ВАХ) исследуемого прибора.

МОДЕЛЬ

Описание двухзонной комбинированной модели приведено в [2, 3], поэтому ограничимся основными положениями. Модель предназначена для моделирования РТД

на GaAs/AlAs и включает влияние эффекта Г-Х междолинного рассеяния. На первом этапе находится самосогласованное решение уравнений Шредингера и Пуассона в активной области прибора (барьеры с заключенной между ними квантовой ямой). Далее линеаризованное уравнение Пуассона решается для всего прибора, т. е. для активной области и протяженных приконтактных областей. Это позволяет учитывать взаимодействие классических и квантово-механических областей прибора. Преимуществом модели является экономия времени расчета за счет того, что решение двух связанных уравнений Шредингера осуществляется только один раз на втором этапе решения задачи.

На согласование с экспериментальными данными влияет ряд параметров, а именно [2]: площадь поперечного сечения прибора s , константа взаимодействия между зонами α , сопротивление приконтактных областей РТД R , положение границы «сшивки» в областях эмиттера и коллектора. В данной работе исследовано влияние другого параметра – поперечного волнового вектора.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С использованием комбинированной двухзонной модели проводилось моделирование РТД работы [4] на основе GaAs/AlAs при температуре $T = 300$ К. Константа взаимодействия между зонами $\alpha = 0.045$ эВ·нм. Другие параметры приведены в [5].

Для выявления влияния поперечного волнового вектора на результаты расчета ВАХ исследуемого РТД (рис. 1) были взяты: $k_{II} = 0$ м⁻¹ (кривая 1); значение k_{II} работы [5] (кривая 3) и промежуточное значение (кривая 2). Как следует из рис. 1, с увеличением k_{II} происходит смещение пикового напряжения в сторону больших значений и увеличение пикового тока, поэтому учет этого фактора целесообразен.

При моделировании РТД на основе GaAs/AlAs [4] варьировались параметры, а именно: k_{II} , s , α и R . Наилучший результат расчета получен при $\alpha = 0.045$ эВ·нм, $R = 6$ Ом, $k_{II} = 2 \cdot 10^8$ м⁻¹ (кривая 3, рис. 2). Заметим, что экспериментальное значение площади поперечного сечения РТД $s = 49$ мкм².

Для результатов приведенных на рис. 2 величина s отличается от этого значения на 24.5 % в меньшую сторону. С одной стороны, это можно объяснить естественной экспериментальной погрешностью для поперечного сечения активной области РТД, а с другой – неучетом при моделировании других факторов. Видно, что с помощью разработанной двухзонной комбинированной модели могут быть получены удовлетворительные результаты согласования с экспериментом в области долины в отличие от однозонной модели (кривая 2). Из рис. 2 следует, что для рассматриваемой системы материалов важно учитывать влияние взаимодействия между Г- и Х-долинами.

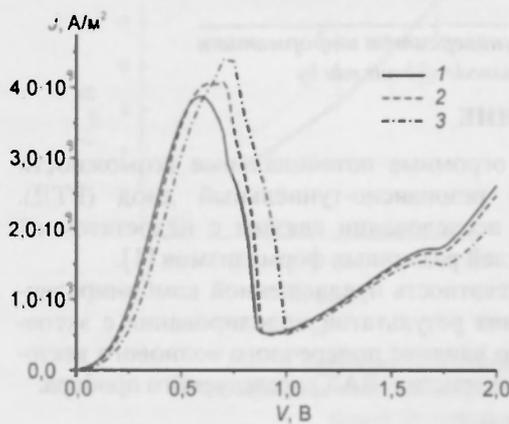


Рис. 1. ВАХ РТД: 1 – $k_{II} = 0$ м⁻¹; 2 – $k_{II} = 1 \cdot 10^8$ м⁻¹; 3 – $k_{II} = 2 \cdot 10^8$ м⁻¹

Далее были проведены исследования ВАХ двухбарьерного РТД2 при температуре 77 К. Параметры РТД2 приведены в [6]. При вычислениях использовались значения электрофизических параметров материалов GaAs/AlAs работы [5]. Все расчеты осуществлялись для случая равномерной сетки с шагом 0.1 нм.

На рисунке 3 показано сравнение ВАХ РТД2, рассчитанной с использованием двухзонной модели (1), с экспериментальными данными (2) работы [6]. Наилучший результат получен при следующих значениях параметров: $\alpha = 0.0384$ эВ·нм, $k_{II} = 2 \cdot 10^8$ м⁻¹, положение границы «сшивки» в областях эмиттера и коллектора $L=1.5$ нм. Более подробно определение границы «сшивки» рассмотрено в работе [7].

Проведенные исследования показали, что согласование результатов расчетов, полученных с использованием двухзонной комбинированной модели, с экспериментальными данными значительно лучше при комнатной температуре, нежели при температуре жидкого азота, особенно в области токов долины на ВАХ РТД (рис. 2 и 3). Это, по-видимому, связано с неучетом влияния на исходные данные температуры окружающей среды, например, деионизации примеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования РТД на основе материалов GaAs/AlAs при температурах 300 К и 77 К подтвердили адекватность разработанной комбинированной двухзонной модели формализма волновых функций. Проиллюстрирована важность учета влияния поперечного волнового вектора при расчете ВАХ РТД.

Модель включена в систему моделирования нанoeлектронных приборных структур NANODEV [8, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов И. И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. V. Резонансно-туннельные структуры // Нано- и микросистемная техника, 2007. № 3. С. 57–70.
2. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коло-

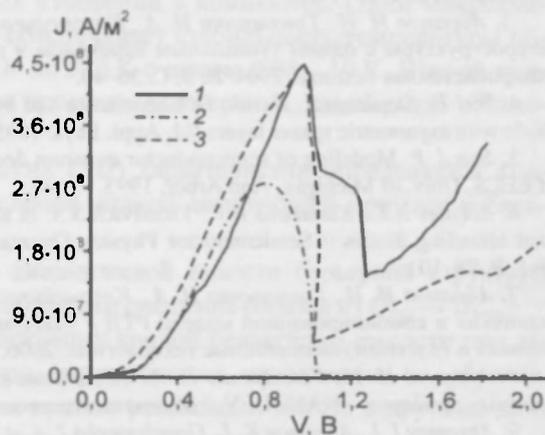


Рис. 2 Сравнение ВАХ РТД, рассчитанных с использованием одиозонной (2) и двухзонной (3) моделей, с экспериментальными данными (1) работы [4]

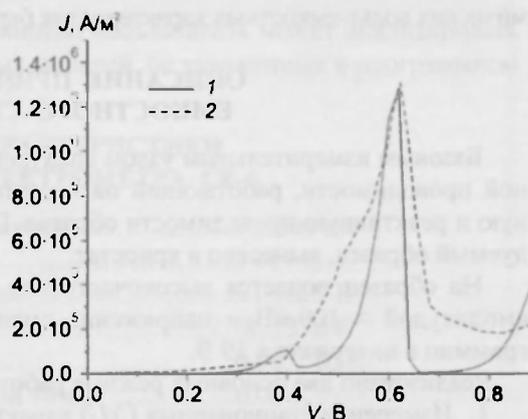


Рис. 3 Сравнение ВАХ РТД2, рассчитанных с использованием двухзонной (1) модели, с экспериментальными данными (2) работы [6]

мейцева Н. В. Комбинированная двухзонная модель резонансно-туннельного диода // ФТП. 2007. Т. 41. № 11. С. 1395–1400.

3. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В. Комбинированная двухзонная модель гетероструктуры с одним туннельным переходом и протяженными приконтактными областями // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 36–40.

4. Wei T., Stapleton S., Berolo O. Capacitance and hysteresis study of AlAs/GaAs resonant tunneling diode with asymmetric spacer layers // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 77. № 8. P. 4071–4076.

5. Sun J. P. Modeling of semiconductor quantum devices and its applications // Ph.D. Theses, Dep. of EECS, Univ. of Michigan, Ann Arbor. 1993. P. 148.

6. Belyaev A.E., Konakova R.V., Vitusevich S.A. et al. Radiation hardness of AlAs/GaAs-based resonant tunneling diodes // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 1999. Vol. 2. № 1. P. 98–101.

7. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В. Исследование влияния границ раздела «сшивки» в комбинированной модели РТД // Материалы 16-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2006. Севастополь. С. 667–668.

8. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А. et al. Система моделирования наноэлектронных приборов – NANODEV // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 2. С. 124–133.

9. Abramov I. I., Abramov K. I., Goncharenko I. A. et al. Simulation of physical processes in nanoelectronic devices with the use NANODEV system // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6260. P. 62601Q-1–62601Q-8.

ЦИФРОВОЙ ЕМКОСТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР СЕ-6

Н. Н. Дедович, В. А. Кузьминых, А. Н. Лазарчик,
В. М. Ломако, В. И. Пранович, А. Ф. Романов

НП ООО «ОМНИТЕЛ», omnitel@vessobel.by

ВВЕДЕНИЕ

Емкостные методы исследования электрических характеристик барьерных структур достаточно широко и результативно используются для измерения концентрации, энергии ионизации и сечения захвата носителей ловушками в полупроводниках.

В данной работе кратко описан разработанный аппаратно-программный комплекс (в дальнейшем – емкостный спектрометр) для измерения статических и динамических вольт-емкостных характеристик барьерных полупроводниковых структур.

ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ЕМКОСТНОГО СПЕКТРОМЕТРА

Базовым измерительным узлом спектрометра является автоматический мост полной проводимости, работающий на частоте 1 МГц, что позволяет разделять активную и реактивную проводимости образца. Плечо моста, в которое включается исследуемый образец, вынесено в криостат.

На образец подается высокочастотное сканирующее напряжение с постоянной амплитудой ~ 100 мВ и напряжение смещения, величина которого задается программно в интервале ± 19 В.

Реализовано два основных режима работы:

1. Измерение стационарных $C(U)$ характеристик при заданной температуре.
2. Измерение динамических характеристик $\Delta C(U, t, T)$.

Все режимы измерений задаются программно из оконного меню компьютера и передаются в приборный блок для исполнения.