

Твердотельная электроника

УДК 621.382.323

В.А. Москалюк, канд. техн. наук. А.В. Федяй

Влияние конструктивных размеров РТД на параметры ВАХ

Рассмотрен вопрос о зависимости основных параметров резонансно-туннельного диода (РТД) на основе соединений AlAs/GaAs от ширины потенциальных барьеров и потенциальной ямы. Моделирование производилось методом неравновесных функций Грина с учетом рассеивания.

The question of the dependence of the main parameters of resonant-tunneling diode on the basis of AlAs/GaAs on the width of potential barriers and potential well was considered. The simulation was done by means of nonequilibrium Green's function formalism taking scattering into account.

Введение

РТД, в котором осуществляется квантовый транспорт, отличается от «классических» компонентов тем, что изменение характерных размеров его активных областей оказывает сильное влияние на электрические характеристики этого диода. Данный вопрос чрезвычайно важен при переходе от экспериментальных к серийным образцам. Действительно, любая технология позволяет получать гетероструктуру с определенной точностью, поэтому разброс значений характерных размеров гетероструктуры приводит к разбросу его электрических параметров. В работе анализируется зависимость электрических параметров структуры от топологических, точнее от размеров слоев, которые образуют потенциальную яму и барьеры.

1. Объект моделирования

Для проведения численного эксперимента был выбран РТД на основе соединений GaAs/AlAs, топология которого изображена на рис. 1. Здесь уровень легирования обозначен градациями оттенков серого цвета; слои, состоящие из AlAs, показаны штриховкой, из GaAs – без штриховки. Эта структура типична для современных резонансно-туннельных диодов и состоит из сильнолегированных слоев (концентрация доноров 10^{18} см^{-3}), которые выполняют функции т.н. «резервуаров» электронов и располагаются по краям изображенной структуры. Между нелегированными потенциальными барьерами шириной b (показаны штриховкой) и резервуарами располагаются слои с промежуточным уровнем легирования – т.н. «спейсеры». Они выполняют важную функцию – препятствуют накоплению заряда вблизи потенциальных барьеров, которое приводит к ухудшению характеристик РТД [1]. Слои, образовавшие потенциальную яму и потенциальные барьеры, вместе называются «устройством» в отличие от прилегающих к ним легированных областей, которые имеют общее название резервуары, или же «эмиттер» и «коллектор», если задана полярность приложенного напряжения. Хотя

иногда к «устройству» относят также спейсерные слои в связи с тем, что их характеристики рассчитываются одновременно с потенциальной ямой и барьерами, а характер транспорта в них также как и в двухбарьерной структуре квантовый.

2. Предмет исследования

Суть работы заключалась в том, чтобы исследовать зависимость параметров ВАХ от ширины слоев AlAs, формирующих потенциальные барьеры, и от ширины b слоев GaAs, формирующих потенциальную яму шириной w (см. рис. 1). При этом остальные размеры, а также профиль легирования РТД остаются неизменными. На рис. 1 размеры $a = 10 \text{ нм}$, $d = 100 \text{ нм}$. Моделирование ВАХ РТД проводилось при следующих вариациях параметров устройства. Ширину ямы изменяли от 11 до 20 слоев атомов GaAs, ширины барьеров – от 5 до 14 слоев AlAs. Постоянные решетки AlAs и GaAs примерно одинаковы и равны 0.565 нм (данные, полученные Gowar в работе [2]). При этом в первом случае ширина барьеров считалась фиксированной и равной 6 постоянным решетки AlAs. Во втором фиксировалась ширина ямы равная 17 постоянным решетки GaAs.

Моделирование производилось с использованием метода неравновесных функций Грина (НРФГ). Описание метода можно найти в работе [3], а математического аппарата метода – в работе [4]. В данной работе использован пакет программ моделирования квантового транспорта, короткое описание которого можно найти в ссылках к работе [5].

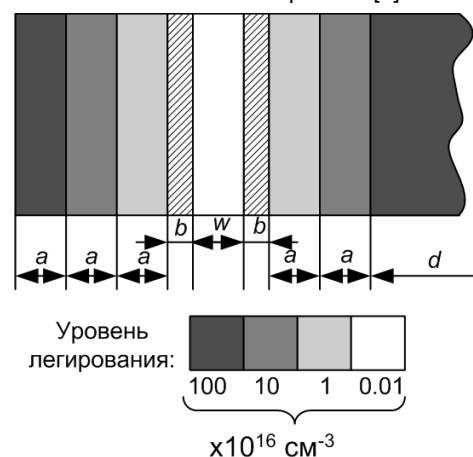


Рис. 1. Топология исследуемого РТД

3. Результаты моделирования

Численные эксперименты были направлены на получение наиболее важных параметров РТД – плотностей тока в пике и долине ВАХ, и их отношения, называемого «peak-to-valley ratio» в иностранной

литературе. Мы же будем называть этот параметр «контрастностью» ВАХ. Результаты моделирования зависимости токов в «пике» и «долине» ВАХ РТД и контрастности ВАХ от размеров потенциальной ямы приведены на рис. 2, где через J_{peak} обозначена плотность тока в «пике», через J_{valley} - плотность тока в «долине» ВАХ. Зависимость этих же величин от ширины потенциальных барьеров изображена на рис. 3.

Если говорить об общих тенденциях, наблюдаемых на зависимостях, необходимо отметить, что плотности тока, протекающего через РТД в «пике» и «долине», уменьшаются при увеличении ширины потенциальной ямы/барьеров. Зависимость плотности тока в пике от ширины потенциальной ямы может быть оценена из качественной модели РТД, описанной в работе [6]. В отсутствие рассеивания формула для тока при резонансном напряжении имеет вид:

$$J_{peak} = \frac{m^* e^3}{2\pi^2 \hbar^3} \Gamma_{n1} (F - E_c),$$

где m^* - эффективная масса электрона, e - заряд электрона, \hbar - постоянная Планка-Дирака, Γ_{n1} - естественное расширение первого резонансного уровня, F - энергия Ферми электронов, E_c - ширина запрещенной зоны в GaAs. В этом выражении $\Gamma_{n1} \sim \frac{1}{w}$,

где w - ширина потенциальной ямы. Сходный вид имеет также зависимость плотности тока в долине от ширины потенциальной ямы. Однако, эффекты рассеивания, которые включены в модель НРФГ через мнимую часть функции Грина, а также учет перераспределения заряда в полупроводниковой структуре, которые в работе [6] учтены не были, приводят к количественным результатам, которые повторяют тенденции качественных, но все же отличаются от них. Поэтому токи зависят не обратно пропорционально от ширины ямы, а по несколько модифицированным зависимостям. Отсюда сложная зависимость контрастности ВАХ (рис. 2,б). Из рис. 2 нельзя сказать, что увеличение ширины потенциальной ямы положительно сказывается на контрастности, хотя оно однозначно уменьшает плотность резонансного тока.

Более просто можно объяснить зависимость плотности токов в пике и долине ВАХ от ширины потенциальных барьеров. Из основ квантовой

механики, где решается задача о прохождении частицы через потенциальный барьер, известна формула для определения коэффициента прозрачности прямоугольного потенциального барьера шириной b :

$$D = D_0 e^{-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m^*(U_m - E)}b},$$

где $D_0 \approx 1$, U_m - высота потенциального барьера, E - энергия электрона, падающего на барьер. Таким образом, здесь $D \sim e^{-b}$, что также определяет зависимость тока через систему с двумя потенциальными барьерами. С уменьшением прозрачности резонансный ток, очевидно, уменьшается, так как уменьшается вероятность туннелирования через потенциальный барьер. Расчетная зависимость (рис. 3,а) показывает, что кривая плотности тока в логарифмической системе координат спрямляется, что указывает на экспоненциальный характер зависимости в исходной системе координат. Увеличение ширины потенциальных барьеров, однако, преимущественно положительно влияет на контрастность ВАХ (рис. 3,б). Это объясняется тем, что плотность тока в «долине» ВАХ также уменьшается с увеличением ширины барьеров, и, как показывают, рассчитанные зависимости (рис. 3,а) быстрее, чем плотность тока в «пике» ВАХ.

Выводы

Рассмотрен вопрос о влиянии размеров потенциальной ямы и потенциальных барьеров РТД на его статические характеристики. Показано, что изменение этих параметров сильно влияет на плотности токов в «пике» и «долине» ВАХ. Качественно плотность тока обратно пропорциональна ширине потенциальной ямы и экспоненциально увеличивается при уменьшении ширины потенциальных барьеров. Однако качественная картина немного сложнее, особенно это касается контрастности. Это объясняется тем, что метод моделирования, который был использован в этой работе, учитывает эффекты рассеивания и перераспределения электрического заряда в структуре РТД, которые не отражены в качественных моделях, с позиций которых были интерпретированы результаты численных экспериментов.

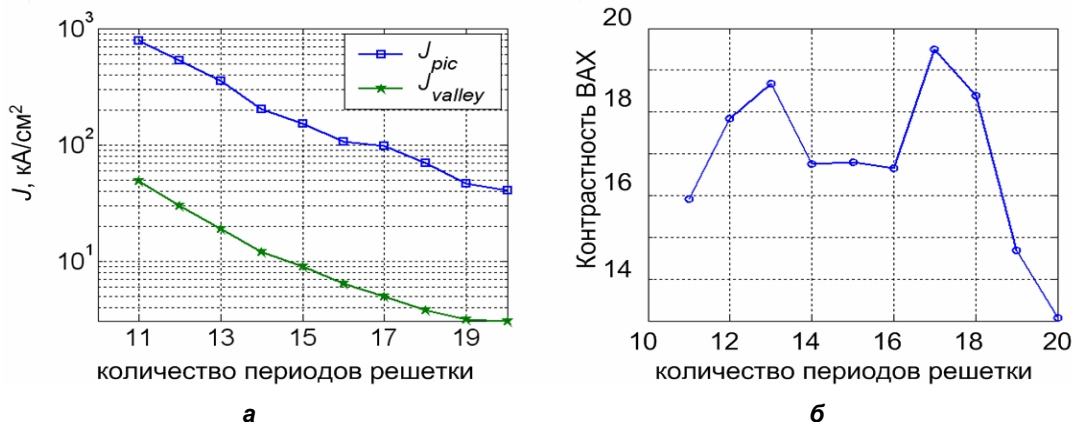


Рис. 2. Зависимость параметров РТД от ширины потенциальной ямы

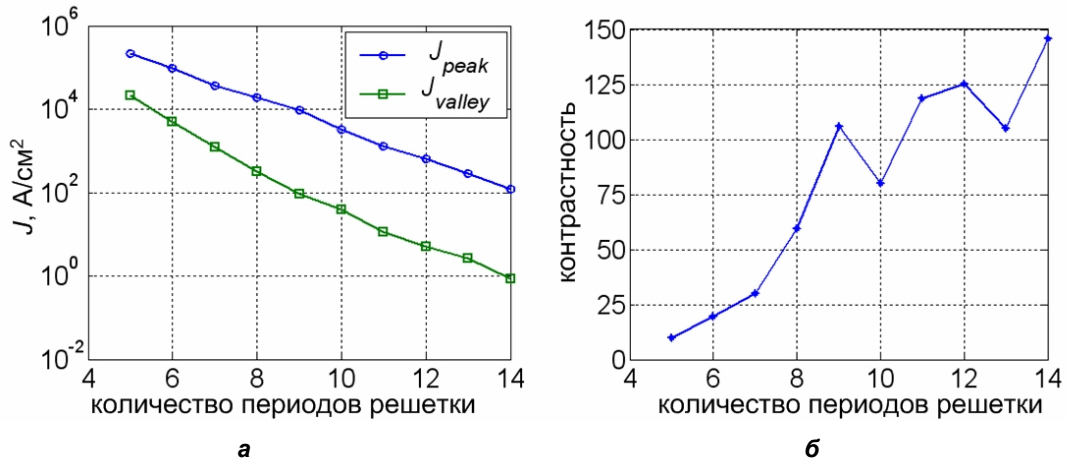


Рис. 3. Зависимость параметров РТД от ширины потенциальных барьеров

В работе показано, что для выхода на промышленный уровень производства РТД необходимы повышенные требования к технологиям молекулярно-лучевой эпитаксии или химического осаждения из газовой фазы, так как изменение характерных размеров особенно сильно сказывается на изменении характеристик РТД.

Литература

1. *Sahay M. et. al.* Importance of space charge effects in resonant tunneling devices // *Applied Physics Letters*. – 1987. - Vol. 50. - P. 612–614.
2. *Gowar J.* Optical communication systems, 2d ed. Englewood Cliffs. N.J.: Prentice Hall, 1993. – 712 p.
3. *Lake R. et. al.* Single and multiband modeling of quantum electron transport through layered semiconductor devices // *Journal of Applied Physics*. – 1997. – Vol. 81. - P. 7845-7869.
4. *Economou E.N.* Green's functions in quantum physics, 3rd ed. – Berlin: Springer Berlin Heidelberg New York, 2006. – 477 p.
5. *Москалюк В.А., Федяй А.В.* Сравнительный анализ статических характеристик резонансно-туннельных диодов на основе AlGaAs и AlGaIn. // *Н.-техн. Сб. «Электроника и связь», тематический выпуск «Проблемы электроники», ч.1, 2007.* – С. 10-14.
6. *Москалюк В.А., Медяный Н.Л.* Статическая модель резонансно-туннельного диода. // *Н.-техн. сб. «Электроника и связь», № 15, 2002.* - С. 172–175.