

УДК 621.382.232

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РТД НА КОЭФФИЦИЕНТ ДБКС

**М.М. Ибадуллин**

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Ленина 14, Харьков 61166,  
e-mail: [razevic@mail.ru](mailto:razevic@mail.ru)

Поступила в редакцию 2 июня 2016 г.

В данной работе приводится краткий ознакомительный обзор влияния структурных и электрофизических параметров РТД на коэффициент ДБКС. Исследование проводилось при изменении следующих параметров: внешнего напряжения, приложенного к структуре, высоты вспомогательных барьеров, а также длины активной области РТД. Одной из целей данного исследования являлся сравнительный анализ структур с разными формами потенциальной ямы, а именно прямоугольной и параболической, это обусловлено интересом к комплементарности реализации структур, а также основной тематикой статьи.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** квантово-размерная структура, энергия электронов, потенциальная яма, активная область, вспомогательный барьер

У роботі наводиться короткий ознайомчий огляд впливу структурних та електрофізичних параметрів РТД на коефіцієнт ДБКС. Дослідження проводилось при зміні наступних параметрів: зовнішньої напруги прикладеної до структури, висоти допоміжних бар'єрів, а також довжини активної області РТД. Однією з цілей даного дослідження був порівняльний аналіз структур із різними формами потенціальної ями, а саме прямокутної та параболическої, це зумовлено інтересом до компліментарності реалізації структури, та основною тематикою статті.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** квантово - розмірна структура, енергія електронів, потенційна яма, активна область, допоміжний бар'єр

In this work provides a brief, introductory overview of the impact of structural and electro physical parameters of RTD on coefficient of DBQS. The research was conducted under changing of the following parameters: an external voltage that applied to the structure, the heights of the auxiliary barriers and the length of the active region RTD. One of the aims of this research is a comparative analysis of structures with different forms of the potential well, namely rectangular and parabolic, it is conditioned by interest to complementarity of implementation of the structures and the main subject of the article.

**KEY WORDS:** quantum - dimensional structure, electron energy, potential well, the active region, auxiliary barrier

### ВВЕДЕНИЕ

Основным структурным элементом современных резонансно-туннельных полупроводниковых приборов является двойной потенциальный барьер с квантовой ямой. Толщины потенциальных барьеров и квантовой ямы таковы, что возможно эффективное туннелирование через каждый из барьеров, а движение электрона поперек ямы квантуется, чему соответствуют дискретные уровни энергии в яме.

Реализуется ДБКС в виде гетероструктуры из повторяющихся слоев более широкозонного полупроводника и слоев с менее широкой запрещенной зоной. Основной особенностью ДБКС является туннелирование через дискретные квантовые уровни в яме. Прохождение тока электронов через такую сложную квантовую структуру, как ДБКС представляет собою сложный процесс.

Резонансно-туннельный диод с параболической потенциальной ямой, так же как и с прямоугольной потенциальной ямой, представлен в виде полупроводниковой структуры, которая имеет соответствующий потенциальный рельеф. Данную структуру можно условно поделить на 3 области: левый и правый «резервуары», а также активную область. Резервуары имеют высокую степень легирования донорной примесью и являются источником носителей заряда [1].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваемая задача заключается в ознакомлении и сравнительном анализе двух квантово-размерных структур с отличными формами потенциальной ямы.

На рис.1 и рис. 2 представлены потенциальные рельефы активной области РТД без приложенного внешнего напряжения  $U_{lat}(z)$ , и изменения потенциала при приложенном напряжении  $U_{lim}(z)$ . Активная область в координате  $z = 0$  имеет длину  $L = 2b + a$ . Каждая из областей характеризуется своим распределением потенциала [2]. Форма  $U_{lat}(z)$  и  $U_{lim}(z)$  определяется следующими параметрами:

- $a$  – ширина потенциальной ямы;
- $b$  – ширина «дополнительных» барьеров;
- $X_{max}$  – максимальная молярная доля Al в соединении  $Al_xGa_{1-x}As$ ;

- $X_{\max} \in [0,33;1]$ ;
- $X_{\min}$  – минимальная молярная доля Al в соединении  $Al_xGa_{1-x}As$ ;
- $X_{\min} \in [0;0,33]$ ;
- $U_{\max}$  – максимальный потенциал активной области;
- $U_{\min}$  – минимальный потенциал активной области.

Данные параметры являются необходимыми и достаточными для решения уравнения Шредингера в задаче с постоянной эффективной массой.

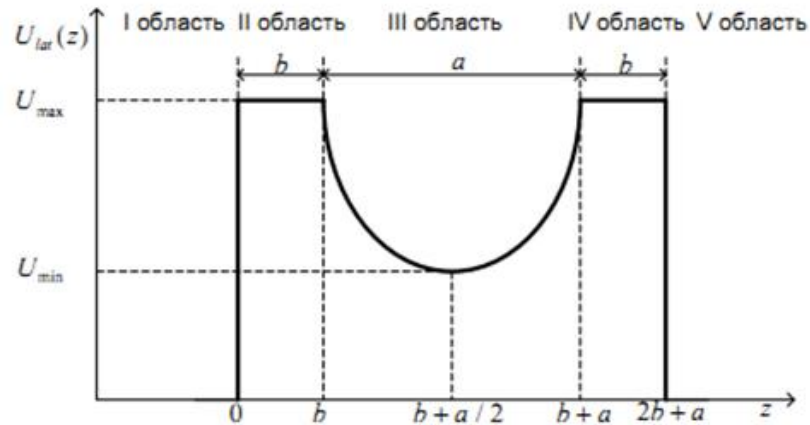


Рис. 1. Распределение потенциала в РТД с параболической ямой

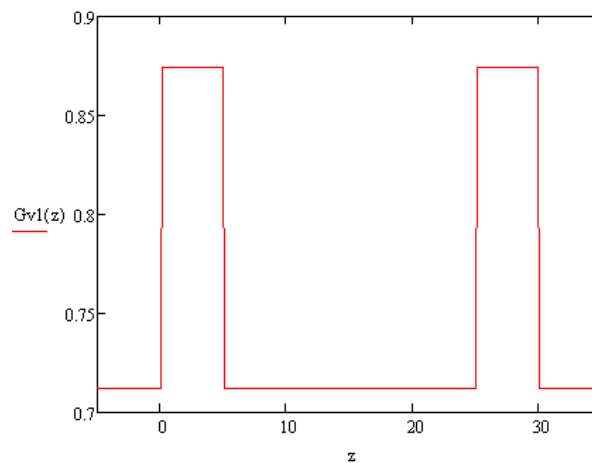


Рис. 2. Распределение потенциала в РТД с прямоугольной ямой

Построение физической модели сводится к решению уравнения Шредингера для каждой активной области, с последующим нахождением коэффициента передачи, который определяет ток, протекающий через РТД.

Исследование зависимости  $D(E)$  проводилось при изменении таких параметров как:

- внешнего напряжения на РТД;
- высот «вспомогательных» барьеров структуры;
- длины активной области РТД.

При изменении одного из этих параметров другие остаются прежними, то есть принимают начальное значение, указанное ранее.

#### СХЕМА РЕШЕНИЯ

Коэффициент передачи в зависимости от приложенного внешнего напряжения показан на рис.3, где представлена зависимость коэффициента передачи от энергии электрона, который двигался из I области в V, как представлено на рис. 1, 2 [3].

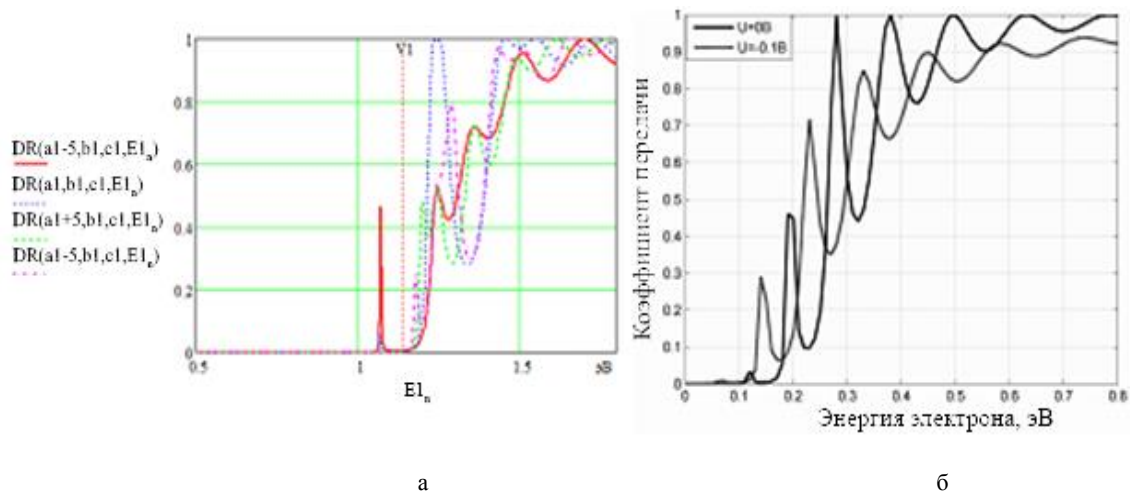


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи от энергии электрона при различных напряжениях

Значение энергии электронов в случае с параболической потенциальной ямой ограничено значением 0.8 В, так как электронов, которые имели бы большее значение энергии, в «резервуарах» не имеется; при энергиях выше указанных график коэффициента передачи стремится к единице, в то время как значение энергии электронов прямоугольной ямы достигает значения в 1.5 эВ.

Положение уровня поперечной энергии в квантовой яме можно регулировать, прикладывая внешнее напряжение; тем самым, основываясь на условии резонансного туннелирования [4]:

$$k_z = \sqrt{2m^*(E_0 - E_c)}/\hbar \equiv k_0 \quad (1)$$

можно повысить количество электронов в эмиттере. Что, в целом, позволит увеличить ток РТД. В случае, если ни один из электронов не удовлетворяет условию резонансного туннелирования, то и ток соответственно не протекает через ДБКС.

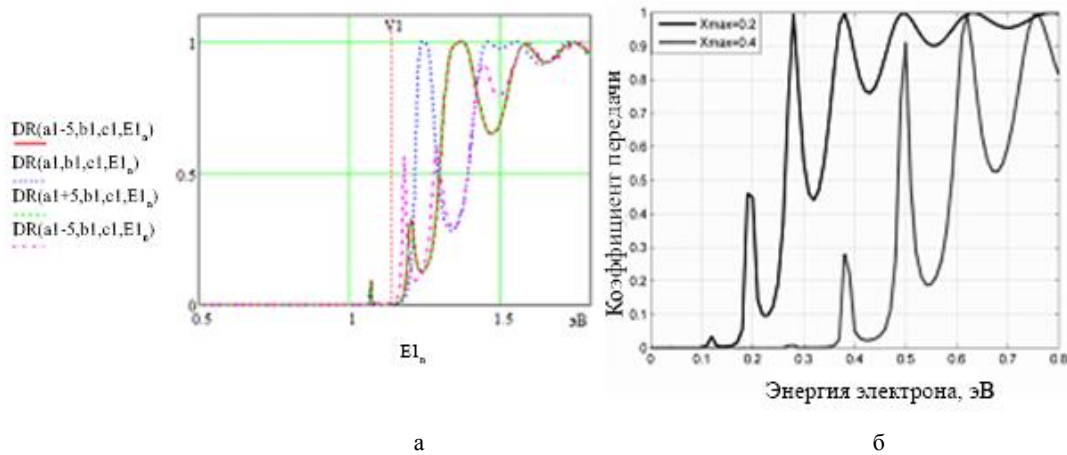


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи от энергии при изменении высоты «вспомогательных» барьеров

Проанализировав графики на рис.4, можно сказать, что при увеличении высоты «вспомогательных» барьеров зависимость коэффициента передачи диода смещается вправо, а при увеличении длины активной области – влево. Длина между пиками увеличивается при изменении длины активной области. Долины данных квантово-размерных структур стали более глубокими, и, как следствие, пики стали более узкими [5].

Указанные изменения можно объяснить тем, что метастабильные уровни в квантовой яме поднялись вверх.

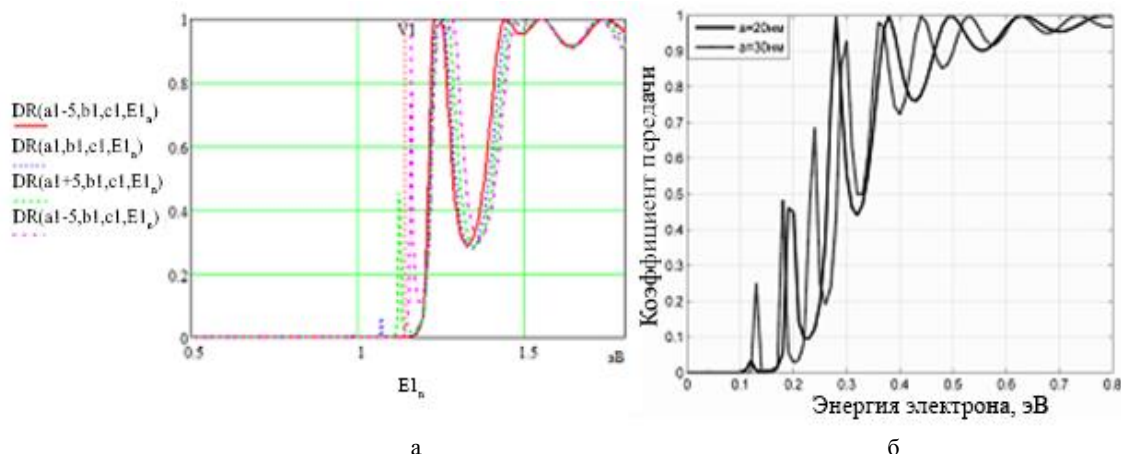


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи от энергии электрона при изменении длины активной области

Увеличение длины активной области РТД приводит к перемещению метастабильных уровней вниз по энергиям, что приводит к:

- перемещению графика левее по энергиям;
- долины становятся более глубокими;
- расстояние между пиками становится меньше;
- пики становятся более узкими.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергетические уровни в параболической потенциальной яме, в отличие от прямоугольной, являются эквидистантными, т.е. расположенными на одинаковом энергетическом расстоянии друг от друга, что указывает на возможность перехода только между соседними уровнями и тем самым показывает высокую комплементарность данной структуры, однако, реализация ее на практике – процесс более сложный и дорогостоящий в сравнении со структурой с прямоугольной потенциальной ямой. Уровни энергии в квантовой яме в действительности не дискретны, а имеют конечную ширину  $\Gamma$ . Такое уширение происходит оттого, что время жизни  $\tau$  электрона в яме за счет выхода через барьеры оказывается конечным, а, следовательно, в силу принципа неопределенности для энергии, энергетические уровни "размываются" на величину неопределенности энергии, имеющей порядок  $\Gamma \sim \hbar/\tau$ . Следовательно, ширина участка ОДП по напряжению конечна, а ВАХ становится более плавной.

Процессы рассеивания и хаотизации фазы электрона при туннелировании делают условие резонанса не единственным, при котором возможен перенос заряда из левого к правому резервуару. Существуют механизмы нерезонансного переноса, которые существенно увеличивают ток "долины" ВАХ. Также было выяснено, что, несмотря на отличие в форме потенциальной ямы, поведение частиц имеет много общего. К примеру, энергетический спектр частицы, находящейся в потенциальной яме как прямоугольной, так и параболической, является дискретным; частица, находящаяся в основном состоянии в обеих структурах, обладает энергией не равной нулю.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов И.И., Гончаренко И.А. Комбинированная модель резонансно – туннельного диода //Физика и техника полупроводников. – 2005. – Том 39, Вып. 9. – С. 1138-1145.
2. Yoder P.D., Grupen M. Demonstration of intrinsic tristability in doublebarrier resonant tunneling diodes with the Wigner transport equation // IEEE Trans. Electron Dev. – 2010. – Vol. 57. – P. 3265–3274.
3. Anantram M.P., Lundstrom M.S. Modeling of Nanoscale Devices // Proceedings of the IEEE. – 2008. – Vol. 96. – P. 1511–1550.
4. Vurgaftman I., Meyer J.R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys // Appl. Phys. – 2001. – Vol. 89, 11. – P. 5815–5862.
5. Фистуль В.И. Туннельные диоды. – М.:Наука, 1962. Том LXXVII, Вып. 1. – 52 с.