

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
**МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**  
**(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

*В.Ф.Елесин, И.Ю. Безотосный, И.Ю. Катеев*

# **ФИЗИКА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУР**

## **Лабораторный практикум**

*Рекомендовано УМО "Ядерные физика и технологии"  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2008

УДК 620.3(076.5)

ББК 22.37я7

Е50

Елесин В.Ф., Безотосный И.Ю., Катеев И.Ю. **ФИЗИКА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУР: Лабораторный практикум.** – М.: МИФИ, 2008. 32 с.

Изложены физические основы резонансно-туннельных структур, рассмотрены различные экспериментальные методики определения параметров таких структур как элементов наноэлектроники.

Практикум предназначен для студентов, обучающихся по специальности Физика конденсированного состояния вещества и специализирующихся по кафедре "Физика твердого тела и наносистем", а также может быть рекомендован для слушателей групп повышения квалификации специалистов в области высокотемпературной сверхпроводимости.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы МИФИ.

Рецензент к.ф.-м.н., доцент Н.Н. Дегтяренко

*ISBN 978-5-7262-1029-2*

© *Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет), 2008*

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

## ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА (ВАХ) РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА (РТД)

*Цель* – изучение особенностей измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) резонансно-туннельного диода (РТД) и связи параметров ВАХ со структурой и свойствами РТД.

### Введение

Простейшими полупроводниковыми наноструктурами, применяемыми в нанoeлектронике, являются двухбарьерные квантовые ямы с одним резонансным уровнем (резонансно-туннельные диоды – РТД). Они имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными устройствами, в частности, высокое быстродействие. В 80-х годах прошлого века Esaki и Tsu было показано, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) РТД имеет пик и область отрицательной дифференциальной проводимости, т.е. с ростом напряжения ток через структуру может падать. Благодаря этому РТД используется в качестве генератора и усилителя высокочастотного электромагнитного поля.

### Резонансно-туннельный диод и его вольт-амперная характеристика

РТД обычно получают путем последовательного напыления на подложку чередующихся квазидвухмерных слоев толщиной 1–10 нм из двух полупроводников. Слои образуют характерный двухбарьерный потенциальный профиль дна зоны проводимости, который показан на рис.1.1. Ширина квантовой ямы обозначена  $a$ , высота барьеров –  $V_b$ , ширина барьеров эмиттера и коллектора обозначена  $b_1$  и  $b_2$ , соответственно. Потенциал меняется только в направлении оси  $x$  роста гетероструктуры, перпендикулярной поверхностям слоев, поэтому поведение электронов в РТД может описываться одномерным уравнением Шредингера:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\hbar}{2m^*(x)} \frac{\partial \varphi(x,t)}{\partial x} \right) + U(x)\varphi(x) = \varepsilon\varphi(x). \quad (1.1)$$

где  $\varphi$  – волновая функция электрона,  $U(x)$  – потенциальная энергия дна зоны проводимости в присутствии приложенного к РТД напряжения,  $\varepsilon$  – энергия, а  $m^*(x)$  – эффективная масса электрона, которая меняется при переходе от слоя к слою.

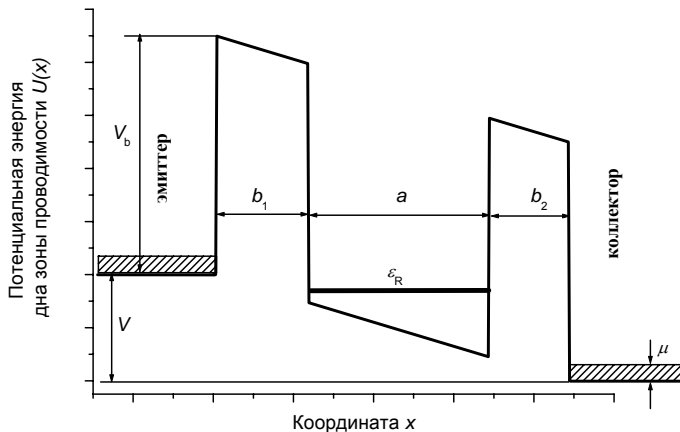


Рис. 1.1

Согласно законам квантовой механики, даже если энергия  $\varepsilon$  меньше потенциальной энергии барьера  $V_b$ , электрон проникает сквозь барьер и попадает внутрь структуры. Из-за своих волновых свойств электрон отражается от всех границ между слоями. При определенном значении энергии  $\varepsilon = \varepsilon_R$  (энергия резонансного уровня) возникает конструктивная интерференция электронов, и коэффициент прохождения  $D$  электронов через РТД принимает максимальное значение. Коэффициент прохождения в случае достаточно узкого уровня можно вычислить по формуле:

$$T(\varepsilon) = \frac{\Gamma^2}{(\varepsilon - \varepsilon_R)^2 + \Gamma^2}, \quad (1.2)$$

где  $\Gamma$  – полуширина уровня. Величина энергии  $\varepsilon_R$  резонансного уровня определяется параметрами ямы и барьеров и зависит от напряжения  $V$ .

Вольт-амперная характеристика РТД, как правило, имеет *N*-образный характер (рис. 1.2). В начальный момент роста напряжения – тока практически нет. Затем с ростом напряжения ток увеличивается, однако после достижения максимума наблюдается его падение (область

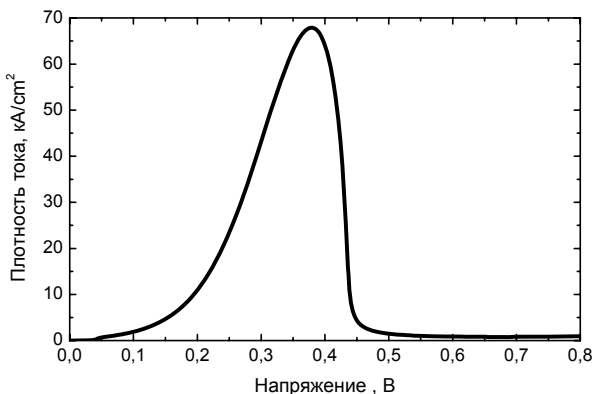


Рис. 1.2

отрицательной дифференциальной проводимости – ОДП). Уменьшение тока связано с тем, что с увеличением напряжения резонансный уровень понижается и оказывается уже ниже дна зоны проводимости эмиттера (рис.1.1), что затрудняет прохождение электронов через структуру.

Считая электроны в структуре когерентными, т.е. имеющими одну фазу, и пренебрегая взаимодействием электронов между собой, зависимость тока  $J$  от напряжения  $V$  можно вычислить теоретически по формуле, выведенной еще Esaki и Tsu в 1973г.:

$$J(V) = \frac{em^*k_B T}{2\pi^2\hbar^3} \int_0^\infty D(\varepsilon, V) \ln \left( \frac{1 + \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon}{k_B T}\right)}{1 + \exp\left(\frac{\mu - \varepsilon - V}{k_B T}\right)} \right) d\varepsilon, \quad (1.3)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $\mu$  – химический потенциал. Величина  $\mu$  определяется концентрацией легированных электронов и температурой. Из формулы следует, что кроме параметров самой структуры, которые неявно включены в коэффициент прохождения  $D$ , на ВАХ влияет и температура.

## Измерение вольт-амперной характеристики резонансно-туннельного диода

В работе используются резонансно-туннельные структуры с двумя квантовыми барьерами, изготовленные методом молекулярно-пучковой эпитаксии слоев на подложку GaAs. В результате напыления образована двухбарьерная структура, параметры которой представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ слоя	Материал	Толщина слоя, Å
1-конт. слой	GaAs, концентр.носителей $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	1000
2-спейсер	GaAs, нелегированный	100
3-барьер	AlAs, нелегированный	23
4-кв. яма	GaAs, нелегированный	45
5-барьер	AlAs, нелегированный	20
6-спейсер	GaAs, нелегированный	400
7-конт. слой	GaAs, концентр.носителей $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	5000

Как видно из таблицы, слои сильно различаются по толщине. Слои 3, 4 и 5 составляют собственно резонансно-туннельный диод и определяют его основные свойства. Слои 3 и 5 являются диэлектрическими барьерами, а слой 2 – квантовая яма. Слои 1 и 7 называются контактными слоями, слои 2 и 6 – спейсерами. Эти слои имеют вспомогательный характер, хотя также влияют на свойства РТД.

Характерный поперечный размер резонансно-туннельной структуры 5 – 20 мкм (в зависимости от применяемого фотошаблона), что значительно больше продольных размеров.

Резонансно-туннельные структуры объединяются в микросхему, показанную на рис 1.3.

Две структуры 1 с четырьмя выводами каждая помещены в металлокерамический корпус 3, который снаружи защищен внешним корпусом из золоченого ковара 4. Внешние контакты 2 для образования омического контакта соединены с выводами структур золотыми проволоками (на рисунке не показаны). Внешние контакты можно проводами подключать к необходимым приборам.

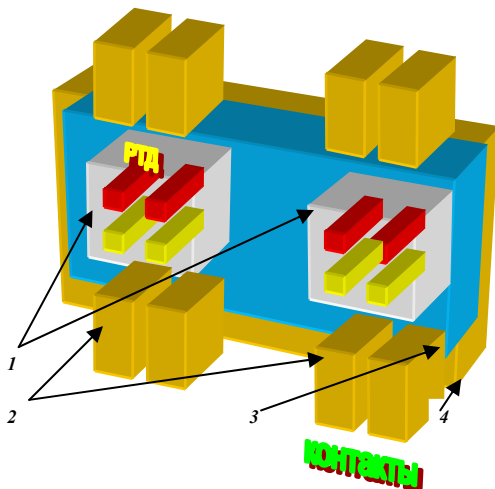


Рис. 1.3

Измерение вольт-амперной характеристики РГД производится стандартным четырехконтактным способом.

Так как структура несимметрична (слои №1 и 7, №2 и 6 из таблицы 1 заметно различаются по толщине), то измерения ВАХ в прямом и обратном направлениях будут давать различные результаты. Основными параметрами, характеризующими ВАХ, являются отношение токов пик – долина (чем больше отношение, тем больше усиление и тем легче получить генерацию большей мощности), положение и ширина области отрицательной дифференциальной проводимости ОДП. Ток пика – максимальный ток на границе области ОДП, ток долины – минимальный, разница токов  $\Delta I$ . Ширина области ОДП  $\Delta U$  равна разности напряжений конца и начала об-

ласти ОДП. Тогда средняя мощность возможного излучения оценивается по формуле  $P=\Delta I\Delta U/16$ .

## Описание экспериментальной установки

На рис. 1.4 представлена функциональная схема измерения статических вольт-амперных характеристик резонансно-туннельных структур.

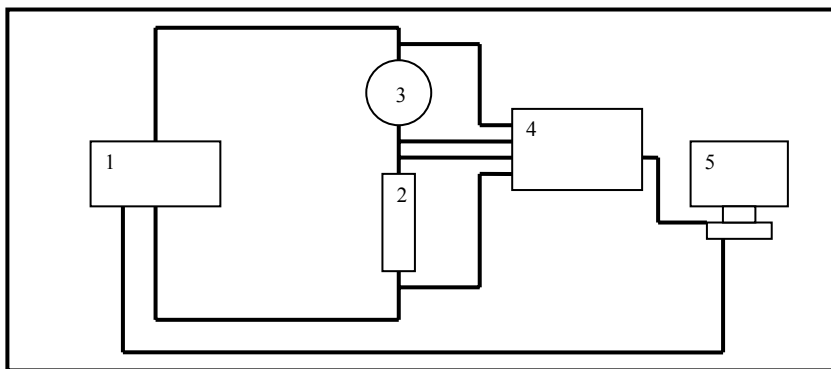


Рис. 1.4

С источника тока  $I$  подается плавно нарастающее напряжение на образец  $3$  и включенное последовательно с ним измерительное сопротивление. Скоростью нарастания напряжения, максимальной и минимальной амплитудой управляет компьютер  $5$ . Значения падения напряжения на образце и образцовом сопротивлении  $2$  измеряются вольтметром или платой АЦП  $4$  и поступают на компьютер для записи и последующей обработки.

Для проведения измерений необходимо включить компьютер, источник тока и вольтметр. Затем запустить программу управления источником тока и записи значений и установить пределы изменения напряжения, заданные преподавателем. Используя компьютерную программу, провести измерения ВАХ в прямом и обратном направлении и распечатать на принтере полученные графики.





















































