

## QUANTUM WELLS, WIRES AND DOTS

V. Ya. DEMIKHOVSKII

*Electrons in microscopic semiconductor structures can display astounding quantum behavior. This structures, namely, quantum wells, wires and dots are expected to be the basis of new generation of electronic and optoelectronic devices.*

**Движение электронов в микроскопических полупроводниковых структурах подчиняется законам квантовой механики. Эти структуры – квантовые ямы, нити, точки – должны стать основой нового поколения электронных и оптоэлектронных приборов.**

## КВАНТОВЫЕ ЯМЫ, НИТИ, ТОЧКИ. ЧТО ЭТО ТАКОЕ?

В. Я. ДЕМИХОВСКИЙ

Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского

Посвящается Б.А. Тавгеру, другу и учителю

### ПОЧЕМУ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ПРЕВРАЩАЕТСЯ В ИНЖЕНЕРНУЮ НАУКУ?

Квантовая механика – это фундаментальная наука, изучающая свойства мельчайших частиц вещества. Ее законы описывают поведение электронов, атомов или молекул и кажутся весьма странными, необъяснимыми с точки зрения здравого смысла. То, что справедливо в мире обычных тел, с которыми мы имеем дело в технике или повседневной жизни, нередко оказывается неверным в мире атомов.

До недавнего времени инженеры – разработчики электронных приборов в своих расчетах использовали только законы классической физики. И это было вполне оправданно, поскольку, например, в обычном кинескопе телевизора электроны движутся так же, как классические материальные точки – бильярдные шары или мячи. В сложнейшем микропроцессоре компьютера, на котором я провожу расчеты и набираю текст этой статьи, движение микроскопических электронов также подобно движению классических тел. Однако ситуация меняется. Логика развития современной полупроводниковой электроники такова, что интегральные схемы становятся все более сложными и объединяют все большее число элементов. До сих пор изготовителям интегральных схем удавалось увеличивать плотность размещения транзисторов, диодов и других элементов за счет уменьшения их размеров. Вероятно, что в недалеком будущем эти размеры станут порядка нескольких долей микрона. В тот момент, когда это произойдет, описание на языке классической физики потеряет всякий смысл и создатели электронных приборов будут вынуждены обратиться к квантовой механике.

Не дожидаясь этого момента, физики уже накопили большой опыт в разработке приборов, действие которых основано на квантовомеханических принципах. Укладывая атомы с точностью до одного-двух слоев, они могут создавать искусственные кристаллы, молекулы и даже атомы с заданными свойствами. Такие полупроводниковые структуры имеют размеры в несколько нанометров или несколько десятков ангстрем (напомним, что нанометр равен  $10^{-9}$  м и в десять тысяч раз меньше толщины

человеческого волоса). Хотя указанные размеры еще превышают размеры настоящих атомов, электроны в этих структурах ведут себя как квантовые объекты. Можно выделить три основных типа микроструктур: квантовые ямы, нити и точки, причем последние иногда называют искусственными атомами. Изучение этих структур не только открывает новые страницы электронной инженерии, но и сопровождается открытиями фундаментального характера.

В статье речь пойдет о физике полупроводниковых структур. Мы познакомимся с основными идеями, которые используются при разработке квантовых электронных приборов, а также с некоторыми проблемами нанотехнологии. Но прежде всего нам предстоит рассмотреть ряд основных положений квантовой механики, что позволит получить по крайней мере качественное представление о характере явлений, наблюдаемых в квантовых ямах, нитях, точках.

## КЛАССИЧЕСКИЕ И КВАНТОВЫЕ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

В классической физике электроны, как и все другие частицы, движутся по траекториям, которые можно рассчитать с помощью уравнений Ньютона. Электроны имеют массу  $m$  и электрический заряд  $e$ . В области, где есть электромагнитное поле, они движутся ускоренно, а там, где поля нет, движение равномерное и прямолинейное. В любом случае, задавая начальную координату и импульс (или скорость), можно вычислить траекторию. Так, например, с помощью классических уравнений движения рассчитываются электронные траектории в кинескопе или магнетроне. Однако сколь привлекательной и естественной ни казалась бы классическая картина движения, от нее приходится отказаться, если мы собираемся рассматривать электроны, движущиеся в микроскопически малых объемах. Представления, полученные на основе повседневного опыта и чувственного восприятия, неприменимы к микромиру [1].

В квантовой механике картина движения совершенно иная. Эта теория не описывает движения по траектории. Дело в том, что в квантовой механике накладывается ограничение на точность, с которой могут быть заданы начальная координата и импульс частицы. Если координата частицы известна с точностью  $\Delta x$ , то ее импульс можно определить не точнее, чем

$$\Delta p \geq \frac{\hbar}{\Delta x}. \quad (1)$$

Это знаменитое соотношение неопределенностей Гейзенберга, причем фигурирующая здесь величина  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$  эрг · с называется постоянной Планка или квантом действия. Согласно соотношению неопределенностей, очень точное задание координаты электрона  $\Delta x$  приводит к большой неопределен-

ности импульса  $\Delta p$  и, значит, направление, по которому будет двигаться электрон, предвидеть невозможно.

Рассмотрим сначала, как соотношение неопределенностей сказывается на характере свободного движения. Пусть частица помещена в область размером  $a$ . Тогда, согласно (1), разброс ее импульсов по порядку величины будет равен  $\Delta p \geq \hbar/a$ . Если бы мы следили за движением группы классических частиц, которые локализованы в области  $a$  и имеют некоторый разброс импульсов, то увидели бы, что эти частицы разбегаются. За время  $\Delta t = 2a/\Delta v$  рой частиц разбежится по области размером  $2a$ . Оказывается, что движение одной квантовой частицы, на которую не действуют внешние силы, в известном смысле аналогично эволюции рои классических частиц. Спустя некоторое время частица, локализованная в ограниченной области, может быть обнаружена в интервале больших размеров. Какой именно путь выберет частица и где она будет обнаружена, предсказать заранее невозможно. Известно только одно: чем точнее определена начальная координата и чем менее точно известен импульс, тем быстрее частица будет удаляться от начальной области локализации. Если вначале частица находилась в области  $a$  и, согласно соотношению неопределенностей, разброс скоростей был равен  $\Delta v = \Delta p/m = \hbar/am$ , то за время  $\Delta t = 2ma^2/\hbar$  область локализации увеличится вдвое. Определенная таким образом величина  $\Delta t$  задает время расплывания начального распределения.

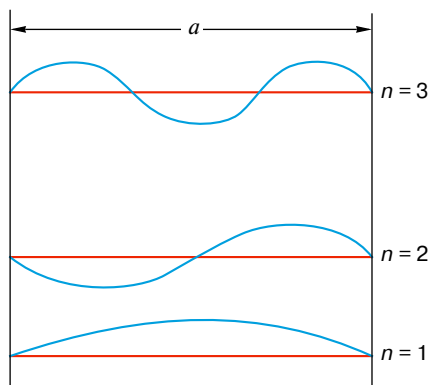
Необходимо сказать о главной особенности квантовомеханического описания. Если в некоторый момент времени частица находилась в ограниченной области пространства, то в будущем невозможно достоверно предсказать ее местоположение. Можно говорить о распределении частицы в пространстве и о вероятности этого распределения. Величина, описывающая это распределение, получила название  $\Psi$ -функции или волновой функции. В чем смысл этой таинственной величины, обозначаемой греческой буквой пси? Она не описывает усредненное поведение большого числа электронов или одного электрона, заряд которого “размазан” по всему пространству. Она дает вероятностное, статистическое описание отдельного электрона. Интенсивность этой функции, а точнее, ее квадрат  $|\Psi|^2$  определяет вероятность обнаружить частицу в той или иной области, точнее, вероятность обнаружить частицу в интервале  $\Delta x$  равна  $|\Psi|^2 \Delta x$ . Волновая функция — это основная характеристика квантовой системы. Она содержит полную информацию об электронах или других частицах в атоме, молекуле, кристалле.

Итак, квантовая механика дает совершенно новую картину физического мира. Электрон подобен волне. Он может испытывать интерференцию, проникать через узкие щели и барьеры, но вместе с тем

сохраняет признаки обычной частицы. Действительно, он имеет строго определенную массу, заряд электрона также фиксирован. Кроме того, подобно классической частице, электрон обладает импульсом и энергией.

Необходимо рассмотреть еще одно проявление чисто квантовой природы электрона. Оказывается, что в том случае, когда движение происходит в ограниченной области, его энергия имеет строго определенные, дискретные значения. Говорят, что спектр энергий квантован. Обсудим природу этого явления. Мы знаем, что волны различной физической природы, возбуждаемые в ограниченном объеме, имеют строго определенную длину волны и частоту. Так, натянутая струна или столб воздуха в трубе органа могут звучать только на вполне определенных частотах. Если дернуть струну посередине, то она будет колебаться так, что в центре образуется пучность. В том случае, когда струна прижата пальцем в средней точке, можно возбудить такое колебание, чтобы было две пучности, и т.д. Это стоячие волны. Чтобы форма колебаний не изменялась со временем, частота должна иметь вполне определенные значения. Говорят, что спектр таких колебаний дискретный.

В квантовой механике ситуация аналогичная. Электрон не бежит в ограниченной области, как классическая частица. Если он заперт в атоме, молекуле или любой потенциальной яме, то волновая функция  $\Psi$  представляет стоячую волну. Если речь идет о прямоугольной потенциальной яме, которая изображена на рис. 1, то по своей форме волна будет такой же, как и в случае натянутой струны, однако, во-первых, природа волны здесь иная, а во-вторых, дискретным в этом случае будет не спектр частот, а спектр энергий. Стоячие волны, описывающие электронные состояния в яме, — это синусоиды, обращенные в точках  $x = 0$  и  $x = a$  в нуль:



**Рис. 1.** Волновые функции и уровни энергии частицы, находящейся в бесконечно глубокой потенциальной яме. Показаны три нижних энергетических уровня (красный цвет) и три волновые функции

$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{\pi x}{a} n, \quad (2)$$

где  $n$  — номер квантового состояния,  $a$  — размер ямы. На рис. 1 изображены три такие функции, соответствующие  $n = 1, 2, 3, \dots$  Мы видим, что электронная плотность в яме распределяется неравномерно, есть максимумы и минимумы плотности вероятности. Из формулы (2) следует также, что длины волн  $\Psi$ -функций, описывающих электронные состояния с различными  $n$ , удовлетворяют условиям  $\lambda_n/2 = a/n$ , то есть в яме укладывается целое число полуволн.

Теперь найдем разрешенные уровни энергии электрона, находящегося в потенциальной яме. Это можно сделать решив уравнение Шрёдингера, но мы воспользуемся сейчас правилом квантования Н. Бора. Согласно постулату Бора, в потенциальной яме разрешены лишь те траектории, для которых импульс частицы  $p_n$  и ширина ямы  $a$  связаны соотношением

$$p_n a = \pi \hbar n. \quad (3)$$

Здесь  $n$  — номер квантового состояния. Определив отсюда разрешенные значения импульса, без труда найдем и уровни энергии в яме:

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2. \quad (4)$$

Обратите внимание на то, что минимальная энергия частицы, находящейся в яме, не может быть равной нулю. Всегда существует так называемая энергия нулевых колебаний, которая, согласно формуле (4), равна  $\pi^2 \hbar^2 / (2ma^2)$ . Посмотрим, какой порядок имеет величина первого уровня в реальной квантовой яме. Если ширина ямы равна 5 нм, то, согласно (4), имеем  $E_1 = 0,02$  эВ. Нужно, однако, иметь в виду, что электронная масса в кристалле может существенно отличаться от массы свободного электрона  $m = 10^{-27}$  г. В типичной ситуации эффективная масса в квантовой яме в десять раз меньше массы свободного электрона. Тогда при той же ширине ямы получим  $E_1 = 0,2$  эВ. Эта величина и определяет характерный масштаб электронных энергий в квантовых структурах.

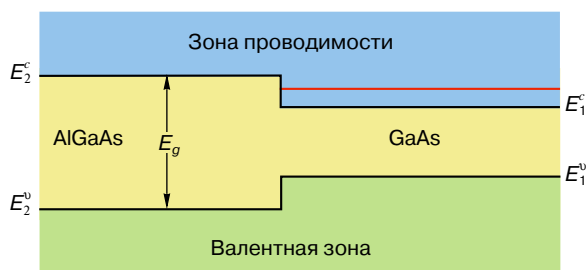
Теперь, рассмотрев основные положения квантовой механики, необходимые для понимания процессов, происходящих в полупроводниковых структурах, обсудим некоторые проблемы нанотехнологии.

## КАК СОЗДАЮТСЯ КВАНТОВЫЕ СТРУКТУРЫ

Простейшая квантовая структура, в которой движение электрона ограничено в одном направлении, — это тонкая пленка или просто достаточно тонкий слой полупроводника. Именно на тонких пленках полуметалла висмута и полупроводника InSb впервые наблюдались эффекты размерного

квантования [2]. В настоящее время квантовые структуры изготавливают иначе. Познакомимся с основными приемами современной нанотехнологии, однако прежде необходимо рассмотреть структуру энергетического спектра полупроводников. Этот спектр состоит из разрешенных и запрещенных энергетических зон, которые сформированы из дискретных уровней атомов, образующих кристалл. Самая высокая энергетическая зона называется зоной проводимости. Ниже зоны проводимости расположена валентная зона, а между ними лежит запрещенная зона энергий. У одних полупроводников запрещенные зоны широкие, а у других более узкие. Что произойдет, если привести в контакт два полупроводника с различными запрещенными зонами (граница таких полупроводников называется гетероструктурой). На рис. 2 мы видим такую границу узкозонного и широкозонного полупроводников. Для электронов, движущихся в узкозонном полупроводнике и имеющих энергию меньше  $E_2^c$ , граница будет играть роль потенциального барьера. Два гетероперехода ограничивают движение электрона с двух сторон и как бы образуют потенциальную яму.

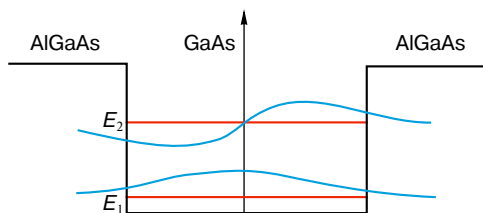
Таким способом и создают квантовые ямы, помещая тонкий слой полупроводника с узкой запрещенной зоной между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной. В результате электрон оказывается запертым в одном направлении, что и приводит к квантованию энергии поперечного движения. В то же время в двух других направлениях движение электронов будет свободным, поэтому можно сказать, что электронный газ в квантовой яме становится двумерным. Таким же образом можно приготовить и структуру, содержащую квантовый барьер, для чего следует поместить тонкий слой полупроводника с широкой запрещенной зоной между двумя полупроводниками с узкой запрещенной зоной.



**Рис. 2.** Энергетические зоны на границе двух полупроводников – гетероструктуре.  $E^c$  и  $E^v$  – границы зоны проводимости и валентной зоны,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны. Электрон с энергией меньше  $E_2^c$  (уровень показан красным цветом) может находиться только справа от границы

Для изготовления подобных структур разработано несколько совершенных технологических процессов, однако наилучшие результаты в приготовлении квантовых структур достигнуты с помощью метода молекулярно-лучевой эпитаксии. Для того чтобы с помощью этого метода вырастить тонкий слой полупроводника, нужно направить поток атомов или молекул на тщательно очищенную подложку. Несколько потоков атомов, которые получают испарением вещества из отдельных нагретых источников, одновременно летят на подложку. Чтобы избежать загрязнения, выращивание структуры производят в глубоком вакууме. Весь процесс управляется компьютером, химический состав и кристаллическая структура выращиваемого слоя контролируются в процессе роста. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет выращивать совершенные монокристаллические слои толщиной всего несколько периодов решетки (напомним, один период кристаллической решетки составляет около 2 Å).

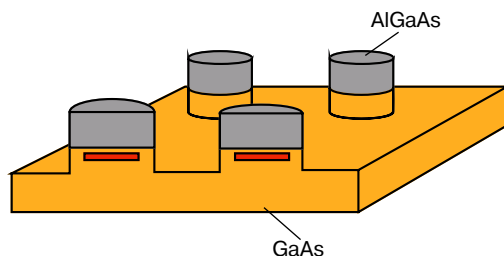
Чрезвычайно важно, чтобы периоды кристаллических решеток двух соседних слоев, имеющих различный химический состав, были почти одинаковыми. Тогда слои будут точно следовать друг за другом и кристаллическая решетка выращенной структуры не будет содержать дефектов. С помощью метода молекулярно-лучевой эпитаксии можно получить очень резкую (с точностью до монослоя) границу между двумя соседними слоями, причем поверхность получается гладкой на атомном уровне. Квантовые структуры можно выращивать из различных материалов, однако наиболее удачной парой для выращивания квантовых ям являются полупроводник GaAs – арсенид галлия и твердый раствор  $Al_xGa_{1-x}As$ , в котором часть атомов галлия замещена атомами алюминия. Величина  $x$  – это доля атомов галлия, замещенных атомами алюминия, обычно она изменяется в пределах от 0,15 до 0,35. Ширина запрещенной зоны в арсениде галлия составляет 1,5 эВ, а в твердом растворе  $Al_xGa_{1-x}As$  она растет с ростом  $x$ . Так, при  $x = 1$ , то есть в соединении AlAs, ширина запрещенной зоны равна 2,2 эВ. Чтобы вырастить квантовую яму, необходимо во время роста менять химический состав атомов, летящих на растущий слой. Сначала нужно вырастить слой полупроводника с широкой запрещенной зоной, то есть  $Al_xGa_{1-x}As$ , затем слой узкозонного материала GaAs и, наконец, снова слой  $Al_xGa_{1-x}As$ . Энергетическую схему приготовленной таким образом квантовой ямы мы видим на рис. 3. В отличие от показанной на рис. 1 эта яма имеет конечную глубину (несколько десятых долей электрон-вольта). В ней находятся только два дискретных уровня, а волновые функции на границе ямы не обращаются в нуль. Значит, электрон можно обнаружить и за пределами ямы, в области, где полная энергия меньше потенциальной. Конечно, такого не может быть в классической физике, а в квантовой физике это возможно.



**Рис. 3.** Квантовая яма, сформированная в слое полупроводника с узкой запрещенной зоной, заключенном между двумя полупроводниками, обладающими более широкой запрещенной зоной

Технологи разработали несколько способов получения квантовых точек и нитей. Эти структуры можно сформировать, например, на границе раздела двух полупроводников, где находится двумерный электронный газ. Это можно сделать, если нанести дополнительные барьеры, ограничивающие движение электронов еще в одном или двух направлениях. Квантовые нити формируются в нижней точке V-образной канавки, образованной на полупроводниковой подложке. Если в основание этой канавки осадить полупроводник с меньшей шириной запрещенной зоны, то электроны этого полупроводника будут заперты в двух направлениях.

На рис. 4 показаны квантовые точки, созданные на границе раздела арсенида галлия и арсенида алюминия–галлия. В процессе роста в полупроводник AlGaAs были введены дополнительные примесные атомы. Электроны с этих атомов уходят в полупроводник GaAs, то есть в область с меньшей энергией. Но они не могут уйти слишком далеко, так как притягиваются к покинутым ими атомам примеси, получившим положительный заряд. Практически все электроны сосредотачиваются у самой гетерограницы со стороны GaAs и образуют двумерный газ. Процесс формирования квантовых точек начинается с нанесения на поверхность AlGaAs ряда масок, каждая из которых имеет форму круга. После этого производится глубокое травление, при котором удаляется весь слой AlGaAs и частично слой GaAs (это видно на рис. 4). В результате электроны ока-



**Рис. 4.** Квантовые точки, сформированные в двумерном электронном газе на границе двух полупроводников

зываются запертыми в образовавшихся цилиндрах (на рис. 4 область, где находятся электроны, окрашена в красный цвет). Диаметры цилиндров имеют порядок 500 нм.

В квантовой точке движение ограничено в трех направлениях и энергетический спектр полностью дискретный, как в атоме. Поэтому квантовые точки называют еще искусственными атомами, хотя каждая такая точка состоит из тысяч или даже сотен тысяч настоящих атомов. Размеры квантовых точек (можно говорить также о квантовых ящиках) порядка нескольких нанометров. Подобно настоящему атому, квантовая точка может содержать один или несколько свободных электронов. Если один электрон, то это как бы искусственный атом водорода, если два — атом гелия и т.д.

Кроме простого нанесения рисунка на поверхность полупроводника и травления для создания квантовых точек можно использовать естественное свойство материала образовывать маленькие островки в процессе роста. Такие островки могут, например, самопроизвольно образоваться на поверхности растущего кристаллического слоя. Существуют и другие технологии приготовления квантовых ям, нитей и точек, которые на первый взгляд кажутся очень простыми. Не нужно, однако, забывать, что речь идет о необычных масштабах — все фигурирующие здесь размеры значительно меньше длины световой волны.

## ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Физики всегда думают о том, как использовать новые идеи и явления в технике. Научившись создавать совершенные полупроводниковые структуры — квантовые ямы и барьеры, в которых движение электронов подчиняется законам квантовой механики, — они сразу же приступили к разработке новых электронных приборов. И хотя эти квантовые приборы еще не заменили обычные диоды, транзисторы и пр., их потенциальные возможности оцениваются очень высоко. Рассмотрим принцип действия двух основных приборов современной квантовой электроники.

### Резонансный туннельный диод

Квантовая механика предсказывает совершенно неожиданное поведение частиц, налетающих на потенциальные барьеры. Как обстоит дело в классической физике? Если полная энергия частицы меньше потенциальной энергии в области барьера, то эта частица отражается и затем движется в обратном направлении. В том случае, когда полная энергия превышает потенциальную, барьер будет преодолен. Квантовая частица ведет себя иначе: она преодолевает барьер подобно волне. Даже если полная энергия меньше потенциальной, есть вероятность

преодолеть барьер. Это квантовое явление получило название “туннельный эффект”. Оно используется в резонансном туннельном диоде.

Энергетическая схема этого прибора показана на рис. 5. Он состоит из двух барьеров, разделенных областью с малой потенциальной энергией. Область между барьерами – это как бы потенциальная яма, в которой есть один или несколько дискретных уровней. Характерная ширина барьеров и расстояние между ними составляют несколько нанометров. Области слева и справа от двойного барьера играют роль резервуаров электронов проводимости, к которым примыкают контакты. Электроны занимают здесь довольно узкий энергетический интервал. В приборе используется следующая особенность двойного барьера: его туннельная прозрачность имеет ярко выраженный резонансный характер. Поясним природу этого эффекта. Для этого предположим, что прозрачность каждого барьера мала. Это, однако, не означает, что одновременно будет мала и вероятность туннелирования через двойной барьер. Оказывается, что в том случае, когда энергия электронов, налетающих на барьеры, равна энергии дискретного уровня, туннельная прозрачность резко возрастает. Механизм резонансного туннелирования таков: электрон, проникший в область между барьерами, надолго задерживается там, в результате многократного отражения от левого и

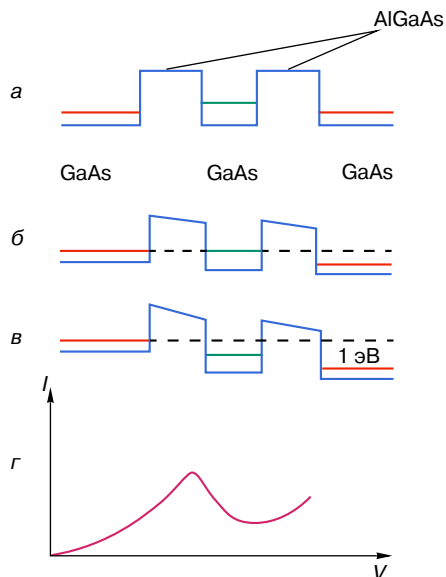
правого барьеров существенно возрастает вероятность туннелирования. Одновременно можно сказать, что при резонансе из-за интерференции волн во внутренней области гасится волна, отражающаяся от двойного барьера. Следовательно, волна, упавшая слева, полностью проходит направо.

Посмотрим теперь, как работает резонансный диод. Ток, протекающий через двойной барьер, зависит от величины приложенного напряжения. Заметим, что потенциал в нашем приборе падает главным образом в области двойного барьера, так как области слева и справа от него обладают высокой проводимостью. Если приложенное напряжение мало и энергия электронов, налетающих на барьер слева, меньше энергии дискретного уровня, то прозрачность барьера и, следовательно, протекающий ток будут малы. Ток достигает максимального значения при таких напряжениях, когда энергия электронов равна энергии дискретного уровня (см. рис. 5, б). При более высоких напряжениях энергия налетающих электронов станет больше энергии дискретного уровня и туннельная прозрачность барьера уменьшится (см. рис. 5, в). При этом ток также уменьшится. Вольт-амперная характеристика резонансного туннельного диода показана на рис. 5, г. Мы видим, что на вольт-амперной характеристике имеется максимум (если в области между барьерами не один, а несколько дискретных уровней, то и максимумов будет несколько). Справа от максимума кривая  $I(V)$  имеет падающий участок, где ток убывает с ростом напряжения. Можно еще сказать, что на вольт-амперной характеристике имеется участок отрицательного дифференциального сопротивления. Благодаря этому в электронных схемах резонансный диод может использоваться не только как выпрямитель, но и выполнять самые разнообразные функции. Если к центральной области резонансного диода подвести контакт, через который можно управлять положением дискретного уровня, получится новый прибор – транзистор. Из таких транзисторов, по-видимому, и будут строиться интегральные схемы новых поколений.

Резонансный туннельный диод – это первое реальное устройство с квантовой ямой и барьерами. Он был создан Лео Эсаки и Чангом в 1974 году. Идея прибора была предложена раньше. Это сделал Л. Иогансен в 1963 году.

### Лазеры на квантовых ямах

Наиболее успешно квантовые структуры используются для создания лазеров [3]. Уже сегодня эффективные лазерные устройства на квантовых ямах дошли до рынка и применяются в волоконно-оптических линиях связи. Посмотрим, как устроены и работают эти приборы. Во-первых, напомним, что для работы любого лазера необходимо создать инверсную населенность энергетических уровней. Другими словами, на более высоком уровне должно



**Рис. 5.** Схема работы и вольт-амперная характеристика резонансного туннельного диода: а – разность потенциалов равна нулю; б – на прибор подано резонансное напряжение, при котором ток максимальный; в – напряжение больше резонансного; г – вольт-амперная характеристика. Зеленым цветом показан энергетический уровень в области между двумя барьерами, красным – уровни электронов в области контактов

находиться больше электронов, чем на низком, в то время как в состоянии теплового равновесия ситуация обратная. Во-вторых, каждому лазеру необходим оптический резонатор или система зеркал, которая запирает электромагнитное излучение в рабочем объеме.

Для того чтобы квантовую яму превратить в лазер, нужно ее подсоединить к двум контактам, через которые электроны могут непрерывно поступать в рабочую область. Пусть через один контакт электроны поступают в зону проводимости. Далее, совершая скачки из зоны проводимости в валентную зону, они будут излучать кванты, то есть порции электромагнитного излучения (рис. 6). Затем через валентную зону носители тока должны уходить на

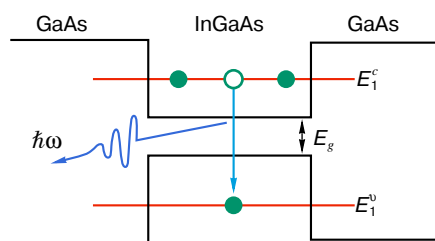


Рис. 6. Энергетическая схема лазера на квантовой яме

другой контакт. В квантовой механике доказывається, что частота излучения  $\omega$  определяется условием

$$\hbar\omega = E_g + E_1^c + E_1^v, \quad (5)$$

где  $E_1^c$  и  $E_1^v$  — энергии первых энергетических уровней соответственно в зоне проводимости и валентной зоне,  $E_g$  — ширина запрещенной зоны.

Электромагнитное излучение, генерируемое лазером, нужно сконцентрировать в центральной, рабочей области прибора. Для этого показатель преломления внутренних слоев должен быть больше, чем внешних. Можно еще сказать, что внутренняя область играет роль волновода. На границах этого волновода нанесены зеркала, которые образуют резонатор.

Лазеры на квантовых ямах обладают преимуществами по сравнению с обычными полупроводниковыми лазерами. Очень важно, что эти приборы можно перестраивать, управляя параметрами энергетического спектра. Так, при уменьшении размеров ямы минимальные энергии электронов  $E_1^c$  в зоне

проводимости и  $E_1^v$  в валентной зоне увеличиваются и, согласно формулам (4) и (5), частота, генерируемая лазером, возрастает. Подбирая толщину квантовой ямы, можно добиться, чтобы затухание волны в оптической линии связи, в которую поступает излучение, было минимальным. Кроме того, в двумерном электронном газе легче создать инверсную населенность. Поэтому лазеры на квантовых структурах очень экономны, они питаются меньшим током, нежели другие полупроводниковые лазеры, и дают больше света на единицу потребляемой энергии — до 60% электрической мощности преобразуется в свет. В последнее время во многих лабораториях мира ведутся работы по созданию лазеров на квантовых точках.

## БУДУЩЕЕ КВАНТОВЫХ НАНОСТРУКТУР

Прошло более 30 лет с тех пор, как началось изучение квантовых эффектов в полупроводниковых структурах. Были сделаны замечательные открытия в области физики низкоразмерного электронного газа, достигнуты поразительные успехи в технологии, построены новые электронные и оптоэлектронные приборы. И сегодня в физических лабораториях активно продолжают работы, направленные на создание и исследование новых квантовых структур и приборов, которые станут элементами больших интегральных схем, способных с высокой скоростью перерабатывать и хранить огромные объемы информации. Возможно, что уже через несколько лет наступит эра квантовой полупроводниковой электроники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пономарев Л.И. Под знаком кванта. М.: Наука, 1989.
2. Тавгер Б.А., Демиховский В.Я. // Успехи физ. наук. 1968. Т. 96, № 1. С. 61.
3. Кастнер М.А. Искусственные атомы // Phys. Today. 1993. Jan. P. 24.

\* \* \*

Валерий Яковлевич Демиховский, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической физики Нижегородского государственного университета. Область научных интересов: теория конденсированного состояния, физика нелинейных явлений. Автор более 100 научных работ.