

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ

В. А. КУЛЬБАЧИНСКИЙ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

SEMICONDUCTOR QUANTUM DOTS

V. A. KULBACHINSKII

We describe the techniques to produce semiconductor quantum dots, structures containing 10^3 – 10^5 atoms, which, like atoms, have electron states with definite energy. Prospects of practical implementation of such structures in nanoscale electronic devices, e.g., lasers, single-electron transistors and memory cells, are discussed.

Рассмотрены методы формирования полупроводниковых квантовых точек, представляющих собой структуры, состоящие из 10^3 – 10^5 атомов, в которых, как в атомах, имеются состояния электронов с определенной энергией. Обсуждаются возможности их практического применения в электронных приборах: лазерах, одноэлектронных транзисторах, элементах памяти наноразмеров.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые нанокристаллы, то есть кристаллы с очень маленькими (около 10–20 нм) размерами, получили в русскоязычной литературе название квантовых точек. Конечно, строго говоря, они не являются точками, но в настоящее время словосочетание “квантовые точки” уже стало термином. Квантовыми их назвали потому, что при столь малых размерах в них проявляются квантовые, то есть дискретные, свойства электронов. Физические свойства кристаллов сверхмалых размеров могут принципиально отличаться от массивных кристаллов, например вещество с металлическими свойствами только за счет уменьшения размеров может перейти в диэлектрическое состояние. Поскольку в последние годы разработаны методы, позволяющие получать нанокристаллы многих веществ, то интерес к ним существует уже не только теоретический, но и практический. К тому же совсем недавно была показана принципиальная возможность создания приборов на основе нанокристаллов, например лазеров или элементов памяти наноразмеров с параметрами лучшими, чем у существующих в настоящее время. Все это еще больше усилило интерес к кристаллам сверхмалых размеров. В статье рассмотрены основные методы получения и возможности практического применения полупроводниковых квантовых точек, которые можно назвать искусственными атомами.

РАЗМЕРНОЕ КВАНТОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Энергию свободного электрона можно записать в виде

$$E = \frac{m_0 V^2}{2} = \frac{p^2}{2m_0}, \quad (1)$$

где V – скорость электрона, p – его импульс, а m_0 – масса. Свободный электрон, согласно этой формуле, может иметь любую энергию. В кристаллическом твердом теле периодический потенциал решетки приводит к тому, что возникают запрещенные интервалы энергии, то есть получается так называемая зонная структура. Запрещенный интервал энергии называется запрещенной

зоной, она разделяет валентную зону и зону проводимости. Для описания свойств электронов в кристаллах используется не обычная классическая физика, а квантовая. В квантовой физике каждой частице ставится в соответствие волна, называемая волной де Бройля, с частотой

$$v = \frac{E}{p} \quad (2)$$

и длиной волны

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (3)$$

(h – постоянная Планка). Для электрона в металлах длина волны де Бройля $\lambda \approx 1$ нм, а в полупроводниках $\lambda \approx 100$ нм.

Если по одному из направлений движение электрона ограничено (например, в тонкой фольге толщиной d) и $d < \lambda$, то возникает так называемое размерное квантование: энергия электрона может принимать только вполне определенные значения

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2md^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

то есть разрешенные значения импульса электрона (в кристалле он называется квазиимпульсом) в этом направлении будут

$$p_n = \frac{\pi \hbar n}{d}. \quad (5)$$

Масса электрона в кристалле m , называемая эффективной массой, отличается от массы свободного электрона m_0 . Она имеет смысл параметра связи между энергией и квазиимпульсом и, как правило, в полупроводниках много меньше массы свободного электрона. По этой причине длина волны де Бройля в полупроводниках велика. Для движения электронов в плоскости сохраняется та же зонная структура, как в массивном кристалле. Минимальная энергия электрона (при $n = 1$) не равна нулю в случае размерного квантования и увеличивается с уменьшением размера структуры d как $1/d^2$.

В квантовой физике существенным является положение, по которому в состоянии с одной энергией может находиться не более двух электронов с разными спинами – это так называемый принцип Паули. Тогда если в структуру мы каким-либо образом добавляем электроны, они будут распределяться по состояниям с увеличивающейся энергией. Для характеристики электронов в кристаллах вводится понятие плотности состояний g , которая определяется как число состояний N для электронов, приходящееся на единичный интервал энергий,

$$g = \frac{dN}{dE}. \quad (6)$$

Плотность состояний двумерных электронов

$$g(E) = \frac{dN}{dE} = \frac{m}{\pi \hbar^2} \quad (7)$$

и не зависит от энергии [1].

В структуре с двумерными электронами можно изготовить одномерные каналы, называемые обычно квантовыми нитями, в которых электрон может двигаться только вдоль одного направления. При ограничении и этого направления получаются так называемые квантовые точки, то есть область полупроводника с обычным размером 5–20 нм по всем трем направлениям. В таком полупроводнике существуют уровни энергии для электрона, подобные атомным.

Плотность электронных состояний в квантовой нити пропорциональна

$$\frac{1}{E^{1/2}} \quad (8)$$

[1], а в квантовой точке это просто уровень или уровни энергии [2]. Именно наличие уровней энергии, которые могут быть заняты электронами, делает физические свойства полупроводниковых квантовых точек во многом похожими на свойства атомов.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ

Схема образования двумерных электронов в гетероструктуре

Прежде чем перейти к методам формирования полупроводниковых квантовых точек, рассмотрим схему образования двумерных структур. Двумерные электроны образуются на плоской границе контакта двух полупроводников с разной шириной запрещенной зоны – так называемой гетероструктуре. Рассмотрим образование гетероперехода на примере двух полупроводников – GaAs и $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ (ширина запрещенной зоны E_{g2} увеличивается при увеличении x). На рис. 1, а представлены зонные диаграммы двух разделенных в пространстве полупроводников разного состава, причем энергия электрона в вакууме выбрана в качестве точки отсчета. Таким образом, внутри полупроводника энергия электрона понижается, то есть для того, чтобы электрон удалить из полупроводника, необходимо затратить определенную энергию.

Когда два различных полупроводника соединяются, у границы их раздела происходит перераспределение электрического заряда и образуется так называемый гетеропереход (рис. 1, б). Электрическое поле, создаваемое электронами в арсениде галлия и ионизированными

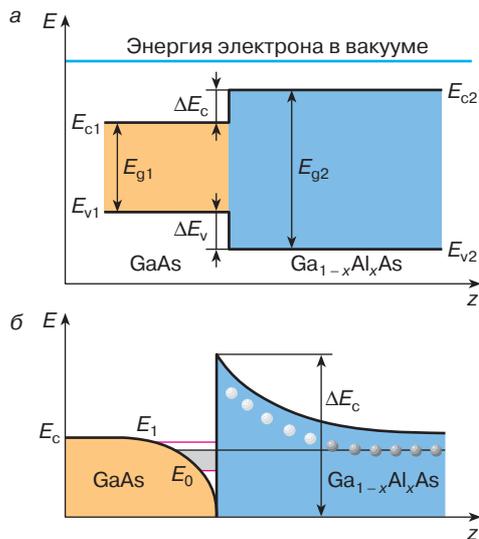


Рис. 1. *а* – зонная диаграмма двух различных полупроводниковых материалов (GaAs и $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$). E_c – дно зоны проводимости, E_v – потолок валентной зоны, E_g – ширина запрещенной зоны. Индексы 1 и 2 относятся к GaAs и $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ соответственно. Все энергии отсчитываются от уровня энергии электрона в вакууме; *б* – профиль дна зоны проводимости E_c гетероперехода. ΔE_c – разрыв зоны проводимости, E_0 и E_1 – уровни размерного квантования. Двумерные электроны в гетеропереходе заштрихованы. Светлые кружки – ионизированные, темные – неионизированные примеси

примесями в твердом растворе арсенида галлия с алюминием (показаны на рис. 1, *б* светлыми кружками), приводит к изгибу зон, и в возникающей квантовой яме образуются несколько уровней энергии.

Характерный размер потенциальной ямы в GaAs в направлении, перпендикулярном гетерогранице, порядка или меньше длины волны де Бройля для электронов в данном полупроводнике, поэтому движение электронов в этом направлении квантовано. При этом электроны могут свободно двигаться вдоль границы раздела материалов, то есть ведут себя как двумерные. Типичной является гетероструктура GaAs/ $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$. Ширина запрещенной зоны E_g в GaAs составляет 1,52 эВ. При добавлении Al величина E_g растет. Для стандартной гетероструктуры при концентрации алюминия $x = 0,3$ разность запрещенных зон составляет $\sim 0,4$ эВ. На границе возникает скачок потенциала, $\sim 60\%$ которого приходится на зону проводимости и $\sim 40\%$ – на валентную зону.

В настоящее время гетероструктуры созданы в самых различных полупроводниках и полупроводниковых соединениях Ge/Si, InAs/GaAs и т.д.

Квантовые ямы и квантовые точки

Последовательный рост двух гетеропереходов приводит к образованию так называемой квантовой ямы. В такой квантовой яме в зависимости от ее размеров возникает один или несколько уровней энергии [2]. При легировании полупроводника эти уровни будут заполнены двумерными электронами, то есть электронами, которые могут двигаться только в плоскости. Ограничив движение двумерных электронов по оставшимся двум направлениям, можно получить квантовую точку. Для этого существуют несколько способов. Проще всего это сделать разрезав электронным или ионным пучком слой полупроводника, в котором находятся двумерные электроны, на области размером $d < \lambda$. Можно использовать избирательное травление поверхности, в результате которого образуются островки – квантовые точки [2]. Минимальный размер точки d , которого удается достичь такими методами, обычно составляет десятки нанометров. При этом расстояние между подзонами размерного квантования в таких структурах получается небольшим. Это легко видеть из формулы (4), так как энергия обратно пропорциональна квадрату d . В настоящее время применяются более совершенные способы, позволяющие получать полупроводниковые квантовые точки с регулируемыми размерами менее нанометра. Рассмотрим некоторые методы получения структур с квантовыми точками, в которых удастся избежать перечисленных выше трудностей.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Одним из эффективных способов изготовления размерно ограниченных структур является **молекулярно-лучевая эпитаксия** [3]. Она представляет собой совершенную технологию выращивания монокристаллических слоев с контролем толщины на уровне атомных размеров, которая позволяет создавать абсолютно новые структуры и приборы. Ее отличие от ранее существовавших различных методов вакуумного напыления заключается в высоком уровне контроля условий конденсации атомов или молекул и возможности управлять этим процессом с большой точностью. Вакуум в установках молекулярно-лучевой эпитаксии составляет $10^{-11} - 10^{-10}$ мм рт.ст. Успехи технологии твердотельных электронных приборов были связаны в основном с соединениями $A^{III}B^V$ (где A^{III} и B^V – элементы III и V группы таблицы Менделеева соответственно). Этот класс полупроводников эффективно применяется для создания быстродействующих высокочастотных приборов. В качестве элемента третьей группы эти соединения содержат обычно Ga, Al или In, а в качестве элемента пятой группы – As, P или Sb. Первыми были синтезированы такие соединения, как GaAs, GaP, $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$,

$\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$. Были изготовлены высококачественные СВЧ- и оптические приборы, требующие высокой точности изготовления различных слоев. Таким образом были созданы полупроводниковые лазеры и СВЧ-транзисторы.

При последовательном выращивании слоев GaAs и $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, имеющих практически одинаковые параметры кристаллической решетки, можно вырастить совершенные структуры, содержащие двумерные электроны. В последние годы было обнаружено, что при пониженных температурах роста при монослойном росте полупроводника с параметрами кристаллической решетки, отличающимися от параметров решетки подложки, можно получить на поверхности роста почти одинаковые по размеру островки. Островки осаждаемого полупроводника пирамидальной формы практически не содержат дефектов, представляют собой квантовые точки. В качестве примера можно привести осаждение InAs (параметр решетки $a_0 = 0,60584$ нм) на подложке GaAs ($a_0 = 0,56533$ нм). Такой процесс получил название самоорганизации квантовых точек в процессе роста (рис. 2, а).

Движущей силой образования островков, а не плоского слоя является стремление системы к минимуму энергии. При несовпадении параметров решетки возникают упругие деформации как возникающего ост-

ровка, так и подложки. Если в процессе роста поверхность остается плоской (пунктир на рис. 2, а), то энергия упругой деформации растет, а энергия поверхности не изменяется. При определенной толщине (обычно несколько монослоев) такая ситуация становится энергетически невыгодной. Минимуму энергии системы будет соответствовать образование трехмерных островков-пирамидок (стрелки на рис. 2, а), в которых основание будет сильно деформировано (для InAs на поверхности GaAs сжато), но деформация будет убывать по мере удаления от подложки к вершине пирамидки. Один слой InAs, называемый смачивающим слоем, отделяет пирамидки от подложки GaAs.

Таким образом, движущей силой образования квантовых точек в процессе самоорганизации является уменьшение энергии деформации. Так, если на подложке из арсенида галлия растить слой арсенида индия, параметры решетки которого больше, то возникнут упругие напряжения, приводящие к росту островков (квантовых точек) InAs на поверхности GaAs. Поверхность покрывается пирамидками InAs с размерами в несколько десятков ангстрем. Оказывается более выгодным формирование островков по сравнению с однородно-напряженной поверхностью. Рост пирамид происходит до полного снятия упругого напряжения на вершине пирамиды.

Образование согласованно-напряженных островков на поверхности зависит от двух параметров: рассогласования решеток и количества осаждаемого на поверхность материала. Минимум энергии соответствует образованию одинаковых по размеру и форме островков. Таким способом удается вырастить не только монослой пирамид на поверхности арсенида галлия, но и последовательные слои, как это показано на рис. 2, б. При этом вершины пирамид являются зародышами образования пирамид в новом слое.

Другим способом роста является метод **газофазной эпитаксии**. В этом методе на кристаллическую подложку в специальном реакторе осаждается требуемое вещество, получаемое из газовой фазы в результате химической реакции. В случае осаждения GaAs основную реакцию можно записать в виде



Осаждение GaAs проходит при 650°C . Если на GaAs осаждают InAs в количестве нескольких монослоев, то можно также получить поверхность, покрытую пирамидками — квантовыми точками. Причина их образования та же самая, что и при росте с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии — уменьшение энергии системы за счет уменьшения энергии упругой деформации. Отметим, что обоими упомянутыми методами получают не только квантовые точки InAs на GaAs подложке, но

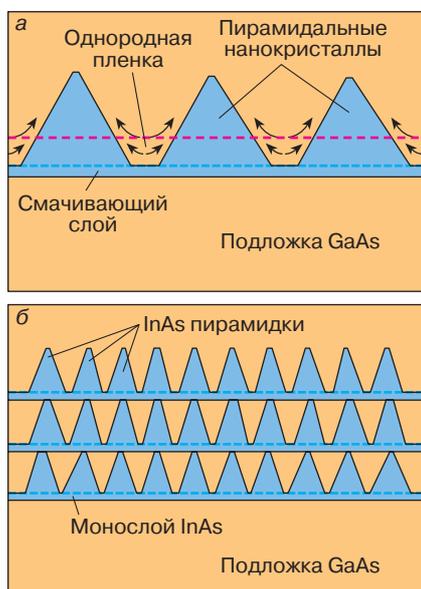


Рис. 2. а — образование пирамидальных островков InAs в результате трансформации плоских слоев этого полупроводника (пунктир), выращиваемых на подложке GaAs с отличающимися параметрами решетки; б — система связанных вертикально квантовых точек InAs на подложке GaAs

и другие квантовые точки, например InAs на InP, InP на GaAs, Ge на Si, CdSe на ZnSe, GaN на $Al_xGa_{1-x}N$ и т.д. Таким образом, формирование квантовых точек в напряженных гетероэпитаксиальных слоях является общим физическим явлением.

Третий способ получения квантовых точек, характеризующий тем, что получают нанокристаллы без внутренних упругих напряжений, основан на методах **коллоидной химии**. Это один из самых старых способов, еще М. Фарадей получал коллоидное золото в 1857 году. Он позволяет получать нанокристаллы элементов II–IV (например, CdS) или III–V (например, InP, GaP, GaInP₂, GaAs, InAs) групп Периодической системы элементов сферической формы размером от 1 до 5 нм в органических растворителях, полимеризующихся при комнатной или более низкой температуре. Отличительными особенностями этого метода являются низкая температура (около 200°C) синтеза коллоидных частиц, возможность широкого изменения концентрации полупроводниковых частиц, небольшая концентрация поверхностных дефектов. Раствор химических реагентов, содержащих соединения элементов II и IV групп, вводят в растворитель, содержащий молекулы, взаимодействующие с поверхностью возникающих наночастиц. Это ограничивает рост частиц. Более крупные частицы можно осадить и получить раствор практически одинаковых по размеру частиц. В настоящее время удается отделить частицы с диаметрами, различающимися только на несколько процентов.

Синтез таким способом веществ III–V групп Периодической системы элементов более труден. Не должно содержаться ни воздуха, ни воды, температура реакции выше, продолжительность реакции дольше, приходится использовать более сложные химические соединения. Самые хорошие результаты получены в настоящее время при синтезе InP. Берется $In(C_2O_4)_3$ и InF_3 или $InCl_3$. Эти вещества взаимодействуют со сложными соединениями, содержащими фосфор. Реакция идет несколько дней при температуре 270–290°C. От продолжительности реакции зависит размер получаемых частиц. В описанном способе частицы покрыты сверху слоем молекул из раствора, которые могут быть замещены на другие, например полимерные. Полученные частицы можно изучать в растворе, в виде порошка или помещать в прозрачный полимер или органическое стекло.

Существует еще довольно распространенный способ приготовления неорганического стекла, окрашенного нанокристаллами соединений II–VI (CdS) и I–VII (CuCl, CuBr, CuI) Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Этот способ связан с промышленным получением светофильтров. Рост полупроводниковых нанокристаллов происходит при распаде пересыщенного раствора ионов в стекле. При этом способе

получаются стабильные твердотельные стекла с вкрапленными нанокристаллами. Рост кристаллов в стеклянной матрице происходит при температуре 550–700°C. Эта температура обычно превышает температуру плавления объемных полупроводниковых кристаллов, составляющую 400–500°C. С уменьшением размера нанокристалла до 1–2 нм температура плавления понижается до 200–250°C. К недостаткам такого роста относятся широкий разброс размеров частиц, невозможность воздействовать на параметры границы раздела стекло–нанокристалл. Отметим, что стекла с нанокристаллическими вкраплениями полупроводников были впервые получены и объяснены как квантовые точки в работах Государственного оптического института и Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе в Ленинграде.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ

Полупроводниковые квантовые точки, то есть кристаллы с размерами в несколько десятков нанометров, по сути представляют собой гигантские молекулы (состоящие из 10^3 – 10^5 атомов), сформированные из обычных полупроводниковых материалов, таких, как InAs, Si, InP, CdSe и т.д. Они существенно меньше традиционных для современной электроники структур с характерными размерами от микрона и более. Во многих случаях свойства нанокристаллов соответствуют атомам. Например, низшее по энергии состояние электрона в нанокристалле соответствует *s*-состоянию электрона в атоме, а следующее – *p*-состоянию. Заполнение состояний двумя или шестью электронами в квантовой точке наиболее выгодно по энергии, в атоме это соответствует полностью заполненному электронным оболочкам.

Структуры с квантовыми точками перспективны для создания полупроводниковых лазеров. Электрон в квантовой точке переходит с одного уровня в зоне проводимости на другой в валентной зоне с испусканием фотона с энергией $h\nu$, равной разности энергий уровней размерного квантования. Если в структуре с множеством одинаковых квантовых точек инициировать согласованные переходы электронов, то возникает лазерное излучение. Электроны на уровне обычно попадают при пропускании тока через структуру. Поскольку понижение размерности кристалла уменьшает ширину зон размерного квантования, в квантовой точке существуют только дискретные уровни энергии, как в атоме, это ведет к более узким оптическим спектрам. В качестве примера на рис. 3 приведен спектр излучения от одной квантовой точки GaAs с переходами между четырьмя различными уровнями. Кроме необычайно узкого спектра излучения еще видна поляризация света в

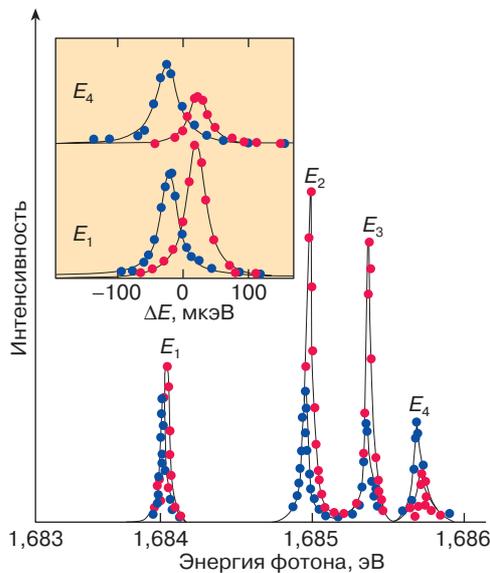


Рис. 3. Спектры излучения одной квантовой точки. Энергии E_i соответствуют переходам между различными уровнями. Разным цветом показано излучение с разной поляризацией. На вставке показаны переходы E_1 и E_4 в большем масштабе

двух взаимно перпендикулярных плоскостях (интенсивности света для двух поляризаций показаны разным цветом).

В структурах полупроводниковых квантовых точек происходит понижение порогового тока лазерной генерации, возможны большие скорости модуляции излучения. Уже получена лазерная генерация от структур с квантовыми точками. Перед учеными сейчас стоит технологическая задача уменьшить разброс размеров квантовых точек при росте структур.

Одноэлектронные транзисторы. Возьмем для определенности сферический нанокристалл. Поместим его в среду с диэлектрической проницаемостью ϵ . Его емкость будет $C = \epsilon R$, а потенциал $U = q/C$, где q – электрический заряд. Для нанокристалла диаметром R в несколько нанометров величина емкости составляет примерно 10^{-18} Ф. Если поместить в него один электрон (заряд $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), то его потенциал изменится на $\sim 0,1$ В и увеличивается пропорционально $1/R$. Этого потенциала вполне достаточно, чтобы воспрепятствовать движению других электронов. Схематическое изображение транзистора с нанокристаллом CdSe в качестве активного элемента приведено на рис. 4. Обычно на подготовленную структуру осаждаются нанокристаллы, и один из них становится активным элементом, как показано на рис. 4. Прибор изготавливается на кремниевой подложке, на которую можно подать напряжение V_g для изменения положения уровня энергии в на-

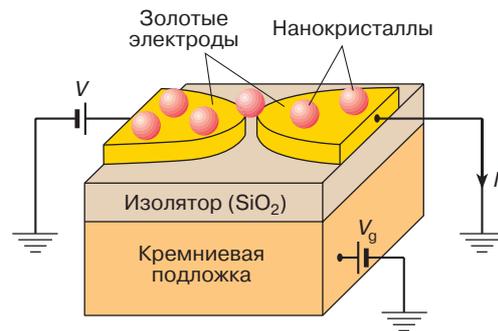


Рис. 4. Схематическое изображение одноэлектронного транзистора с нанокристаллом CdSe в качестве активного элемента

нанокристалле. Подложка отделена слоем окиси кремния SiO_2 от золотых электродов, на которые высажены нанокристаллы. Один из нанокристаллов замыкает электроды. Сопротивление такого прибора обычно составляет около 10 МОм.

На структуре с одиночной квантовой точкой хорошо демонстрируются экспериментально атомные свойства квантовых точек. Если приложить небольшое (несколько милливольт) напряжение V между электродами, то при определенном напряжении V_g (см. рис. 4) электрон может попасть в нанокристалл. Электрон будет попадать на уровень в квантовой точке, если его энергия совпадет с энергией уровня. Число электронов в квантовой точке можно изменять по одному. При этом наблюдается всплеск тока, составляющий 10^{-12} А. При изменении V_g далее опять произойдет всплеск тока. Количество таких всплесков зависит от числа уровней размерного квантования и в принципе определяется размерами нанокристалла. Описанный здесь прибор пока хорошо работает только при очень низких температурах.

На рис. 5 приведена зависимость тока, проходящего через квантовую точку, от напряжения V_g , которое изменяет положение уровня энергии в точке. Каждый пик соответствует прохождению одного электрона. Наблюдаются две существенные особенности: расстояния между пиками не равны и величины пиков разные. Величины пиков определяют энергию, здесь наибольшая энергия соответствует двум и шести электронам, как в атоме при заполнении электронами оболочки (в атоме полностью заполненным электронным оболочкам соответствует число электронов два или восемь в атомах гелия и неона, в точке полностью заполненным состояниям двух уровней соответствуют шесть электронов). Взаимодействие электронов приводит к тому, что их энергия (положение уровня) зависит от числа электронов, находящихся на уровнях размерного

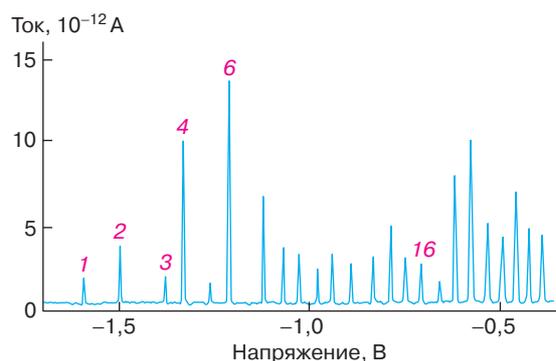


Рис. 5. Зависимость тока от напряжения при последовательном заполнении электронами по одному одной квантовой точки. Числа у пиков – число прошедших электронов

квантования, что приводит к изменению расстояния между пиками на рис. 5. Без взаимодействия уровни должны быть расположены на одинаковом расстоянии.

Появились уже сообщения о создании одноэлектронной памяти, работающей при комнатной температуре. Прибор основан на транзисторе, в котором один электрон, захватываемый в нанокристалл, приводит к запираанию проводимости узкого канала транзистора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из основных и важных выводов научных исследований явилось установление того факта, что свойства электронов в структурах пониженной размерности

не зависят от того, каким образом они образованы. Исследователи продолжают уменьшать размеры структур. Использование нанокристаллов привело к созданию новых классов электронных приборов. Развитие технологии изготовления нанокристаллов уже в ближайшие годы приведет к появлению более быстродействующих приборов с меньшим потреблением энергии и к миниатюризации всех электронных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шик А.Я. Квантовые нити // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 87–92.
2. Демиховский В.Я. Квантовые ямы, нити, точки: Что это такое // Там же. С. 81–86.
3. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Под ред. Л. Ченга, Л. Плога. М.: Мир, 1989. 582 с.
4. Беляховский В.И. Физические основы полупроводниковой технологии // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 10. С. 92–98.

Рецензент статьи А.Э. Юнович

* * *

Владимир Анатольевич Кульбачинский, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ. Область научных интересов – физика низкоразмерных структур, сильных магнитных полей, высоких давлений, сверхнизких температур. Автор более 200 научных работ и одного учебного пособия.