

Квантовый размерный эффект

Особый интерес в практическом отношении представляют электронные свойства наноструктур, обусловленные квантовыми эффектами. Квантовые размерные эффекты начинают оказывать влияние на электронные свойства, когда размер области локализации свободных носителей становится, соизмерим с длиной волны де Бройля

$$\lambda_e = \hbar / \sqrt{2mE},$$

где m – эффективная масса электронов; E – энергия носителей; \hbar – постоянная Планка.

Известно, что для металлов, в которых эффективная масса электронов близка к массе свободных электронов m_0 , а энергия Ферми составляет несколько электрон-вольт, $\lambda_B = 0,1 - 10$ нм, влияние размера зерен нанометаллов на электронные свойства может проявляться лишь для очень малых структурных элементов или в очень тонких пленках. Для этих низкоразмерных структур характерна квадратичная зависимость плотности электронных состояний $N(E)$ от энергии.

В наноструктурах свободное движение электронов ограничено, по крайней мере, в одном, двух или трех направлениях, как это следует из решения уравнения Шредингера с соответствующими граничными условиями и сопровождается изменением характера электронной плотности.

Так электрон, помещенный в ограниченную область пространства, может занимать только дискретные энергетические уровни, при этом самое низкое состояние имеет энергию:

$$E = \hbar^2 \pi^2 / 2ma^2,$$

где \hbar – редуцированная постоянная Планка ($\hbar = \hbar/2\pi$); m – эффективная масса электрона, которая в твердых телах обычно меньше, чем масса покоя

электрона m_0 .

Эта энергия всегда больше нуля. Ненулевая минимальная энергия и отличает квантовомеханическую систему от классической системы, для которой энергия частицы, находящейся на дне потенциальной ямы, тождественно равна нулю.

Конечное минимальное значение энергии электронов и дискретность разрешенных энергетических состояний для них в наноструктуре, возникающие как следствие квантово-волнового поведения электрона в замкнутом пространстве является эффектом квантового ограничения. Он характерен как для электронов, так и для дырок.

В твердых телах квантовое ограничение может быть реализовано в трех пространственных направлениях. То количество направлений в твердотельной структуре, в которых квантовое ограничение отсутствует, используется в качестве критерия для квалификации элементарных наноструктур по следующим группам – квантовые пленки, квантовые проволоки, квантовые точки (рис. 1.).

Квантовые пленки – двумерные ($2D$) структуры, в которых квантовое ограничение действует только в одном направлении – по толщине пленки (направление z). Носители заряда свободно движутся в плоскости xy . Плотность электронных состояний в квантовой пленке в зависимости от энергии имеет ступенчатый вид, который заменяет типичную параболическую зависимость для свободных электронов в трехмерных ($3D$) структурах. Электроны в квантовых пленках обычно называют двумерным электронным газом.

Квантовые проволоки – одномерные ($1D$) структуры, в которых квантовое ограничение действует в двух направлениях, при этом носители заряда могут свободно двигаться в квантовой проволоке только в одном направлении – вдоль оси проволоки. Следовательно, кинетическая составляющая только вдоль одного направления и квантовые значения энергии вносят вклад в общую энергию носителя заряда. Плотность

электронных состояний имеет зависимость от энергии вида $E^{-1/2}$ для каждой дискретной пары состояний в направлении квантового ограничения.

Квантовые точки – нульмерные (0D) структуры, в которых движение носителей заряда ограничено во всех трех направлениях. Энергетическое состояние при этом оказывается квантованным во всех трех направлениях, а плотность состояний представляет собой серию острых пиков, наподобие того, как это имеет место у атомов. Благодаря такому сходству с атомами квантовые точки иногда называют искусственными атомами.

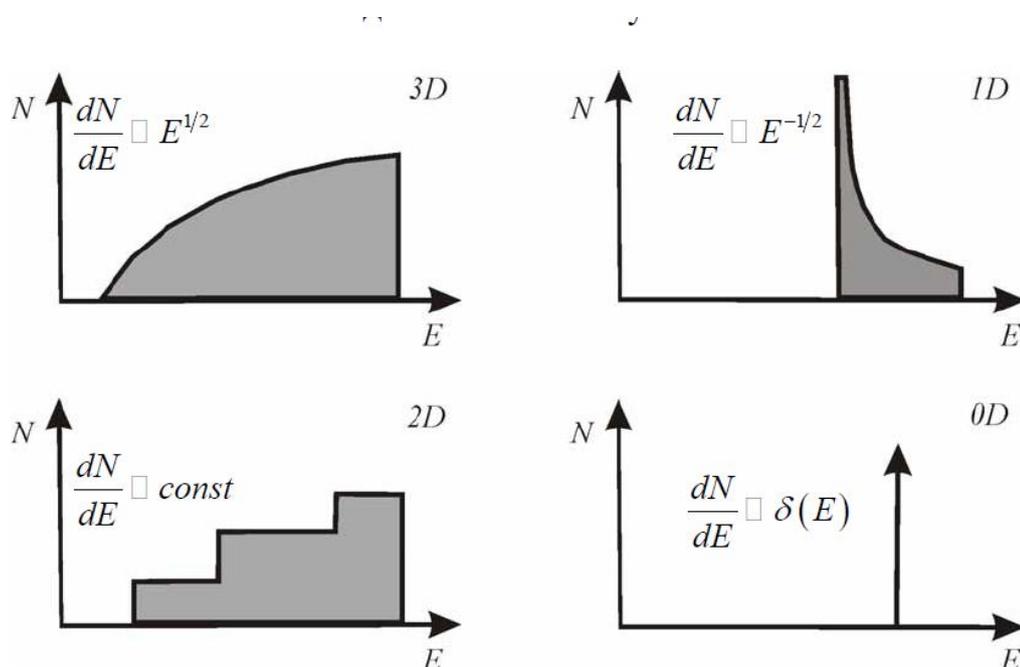


Рис. 1. Плотность состояний $N(E)$ для носителей зарядов в структурах с различной размерностью

Значительные перспективы применения наноматериалов, связаны с развитием наноэлектроники. В основе действия устройств наноэлектроники лежат квантовые эффекты, определяющие поведение подвижных носителей заряда (как электронов, так и дырок) в наноструктурах.

На рис. 2. показаны схемы структуры наноконпозитов, состоящих из различно заряженных кристаллитов. Приложение внешнего электрического поля изменяет заряд поверхностей раздела, соответственно и электронное

строение.

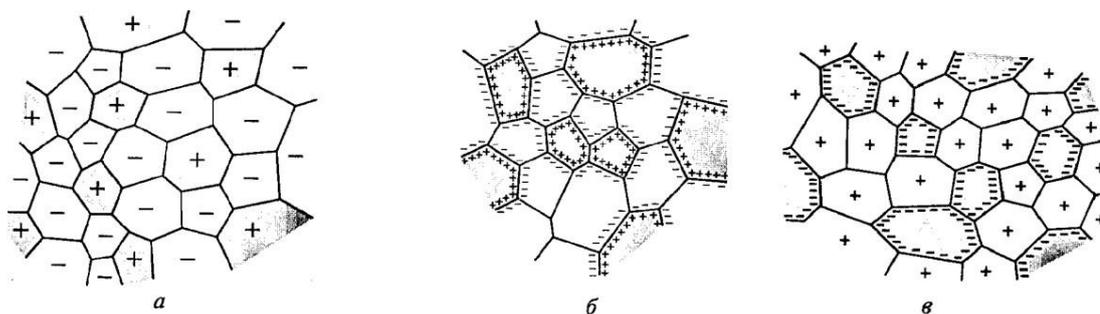


Рис.2. Схемы структуры нанокompозитов, содержащие фазы различного заряда: а – кристаллиты дырочные полупроводники (+) и электронные (-); б – металлические фазы с различной энергией Ферми; в – кристаллиты металлические (+) и полупроводниковые (-).

Так, к примеру, приложение внешнего электрического поля к нанокристаллам платины ($L \sim 10$ нм) приводит к появлению избыточного заряда (до 0,3 заряда электрона на каждый атом).