

## ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

**Ихтиёрова Ш.Б.**

**Туксанова З.И.**

**Авезов И.Ё.**

Студентка Бухарского государственного университета

Бухара, Узбекистан

Старший преподаватель Бухарского государственного университета

Бухара, Узбекистан

Преподаватель Бухарского государственного университета

Бухара, Узбекистан

**Аннотация:** В тезисе рассматриваются физические основы оптических свойств полупроводниковых квантово-размерных систем. К таким системам относятся квантовые ямы, квантовые проволоки и квантовые точки, в которых движение носителей заряда ограничено в одном, двух или трёх пространственных направлениях. Квантовое ограничение приводит к дискретизации энергетического спектра, изменению ширины запрещённой зоны, усилению экситонных эффектов и перестройке спектров поглощения и фотолюминесценции [1], [2]. Показано, что размер, форма, состав и диэлектрическое окружение наноструктуры являются основными факторами, определяющими её оптический отклик.

**Ключевые слова:** квантово-размерные системы, полупроводники, квантовые точки, квантовые ямы, оптическое поглощение, фотолюминесценция, экситон, квантовое ограничение.

### **Введение**

Полупроводниковые квантово-размерные системы занимают важное место в современной физике конденсированного состояния и оптоэлектронике. Их свойства существенно отличаются от свойств объёмных полупроводников, поскольку

размеры таких структур становятся сравнимыми с дебройлевской длиной волны носителей заряда или с эффективным боровским радиусом экситона [1]. В результате энергетический спектр электронов и дырок становится дискретным, а оптические переходы приобретают выраженную зависимость от геометрических размеров системы.

Квантово-размерные структуры принято классифицировать следующим образом: квантовые ямы ограничивают движение носителей в одном направлении, квантовые проволоки — в двух направлениях, а квантовые точки — в трёх направлениях. Наиболее ярко размерная зависимость оптических свойств проявляется в квантовых точках, где уменьшение радиуса приводит к увеличению энергии оптического перехода и сдвигу спектра излучения в коротковолновую область [2], [3].

### Основная часть

Основным критерием проявления квантово-размерного эффекта является соотношение между характерным размером наноструктуры  $R$  и эффективным боровским радиусом экситона  $a_B^*$ :

$$R \leq a_B^*.$$

Эффективный боровский радиус экситона определяется выражением:

$$a_B^* = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r\hbar^2}{\mu e^2},$$

где  $\varepsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\hbar$  — приведённая постоянная Планка,  $e$  — элементарный заряд,  $\mu$  — приведённая эффективная масса электрона и дырки:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}.$$

При выполнении условия  $R \leq a_B^*$  электрон и дырка оказываются пространственно ограниченными, что приводит к изменению энергии оптического перехода. Для сферической квантовой точки в приближении эффективной массы энергия первого оптического перехода может быть представлена в виде уравнения Бруса [1]:

$$E(R) = E_g + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2R^2} \left( \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) - \frac{1.8e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r R},$$

где  $E_g$  — ширина запрещённой зоны объёмного полупроводника,  $m_e^*$  и  $m_h^*$  — эффективные массы электрона и дырки,  $R$  — радиус квантовой точки. Первый дополнительный член описывает энергию квантового ограничения, а второй — кулоновское притяжение между электроном и дыркой.

Из данной формулы следует, что при уменьшении радиуса квантовой точки вклад квантового ограничения возрастает как  $1/R^2$ . Поэтому энергия оптического перехода увеличивается, а максимум поглощения и фотолюминесценции смещается в сторону меньших длин волн. Это является одним из ключевых признаков квантово-размерного эффекта в полупроводниковых нанокристаллах [2], [3].

Оптическое поглощение в полупроводниковых квантово-размерных системах связано с переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости. Коэффициент поглощения можно записать через интенсивности падающего и прошедшего света:

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{1}{d} \ln \frac{I_0}{I},$$

где  $\alpha$  — коэффициент поглощения,  $d$  — толщина образца,  $I_0$  — интенсивность падающего излучения,  $I$  — интенсивность прошедшего излучения. В квантово-размерных системах спектр поглощения имеет более выраженную структуру, чем в объёмных полупроводниках, поскольку разрешённые энергетические состояния становятся дискретными.

Фотолюминесценция является одним из основных экспериментальных методов исследования таких систем. После поглощения фотона в полупроводнике образуется электронно-дырочная пара, которая затем рекомбинирует с испусканием фотона. Энергия испущенного фотона приближённо определяется выражением:

$$E_{\text{ph}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где  $h$ — постоянная Планка,  $\nu$ — частота излучения,  $c$ — скорость света,  $\lambda$ — длина волны. Изменение  $\lambda$  в спектре фотолюминесценции позволяет судить о размере квантовой точки и величине квантового ограничения [2].

Важную роль играют также экситонные эффекты. Экситон представляет собой связанное состояние электрона и дырки. В квантово-размерных системах энергия связи экситона возрастает, поскольку электрон и дырка находятся в ограниченном объёме. Это приводит к усилению экситонных пиков в спектрах поглощения и излучения. Для квантовых ям и квантовых точек такие эффекты являются особенно значимыми при анализе линейных и нелинейных оптических свойств [4].

Кроме линейного оптического отклика, в квантово-размерных системах проявляются процессы многочастичной релаксации, включая оже-рекомбинацию. Для квантовых точек скорость оже-процессов зависит от размера нанокристалла; экспериментально показано, что времена релаксации многоэкситонных состояний существенно изменяются при изменении радиуса квантовой точки [5]. Это важно для светодиодов, лазеров, фотодетекторов и солнечных элементов на основе полупроводниковых наноструктур.

### **Заключение**

Оптические свойства полупроводниковых квантово-размерных систем определяются квантовым ограничением носителей заряда, дискретизацией энергетических уровней и усилением экситонных эффектов. При уменьшении размеров наноструктуры возрастает энергия оптического перехода, что приводит к коротковолновому сдвигу спектров поглощения и фотолюминесценции. Наиболее

ярко этот эффект проявляется в квантовых точках, где движение носителей ограничено во всех трёх пространственных направлениях.

Изучение оптических свойств квантово-размерных систем имеет фундаментальное и прикладное значение. С фундаментальной точки зрения оно позволяет исследовать поведение электронов, дырок и экситонов в условиях пространственного ограничения. С прикладной точки зрения такие системы используются при создании светодиодов, лазеров, фотодетекторов, сенсоров и элементов квантовой фотоники [3], [4]. Следовательно, полупроводниковые квантово-размерные системы являются перспективной основой для развития современной нанооптики и оптоэлектроники.

### Список литературы

- [1] Brus, L. E. **Electron–electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state.** *The Journal of Chemical Physics*, 80(9), 4403–4409, 1984. DOI: 10.1063/1.447218.
- [2] Alivisatos, A. P. **Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots.** *Science*, 271(5251), 933–937, 1996. DOI: 10.1126/science.271.5251.933.
- [3] Talapin, D. V., Lee, J. S., Kovalenko, M. V., Shevchenko, E. V. **Prospects of colloidal nanocrystals for electronic and optoelectronic applications.** *Chemical Reviews*, 110(1), 389–458, 2010. DOI: 10.1021/cr900137k.
- [4] Mittelstädt, A., Schliwa, A., Klenovský, P. **Modeling electronic and optical properties of III–V quantum dots—selected recent developments.** *Light: Science & Applications*, 11, 17, 2022. DOI: 10.1038/s41377-021-00700-9.
- [5] Klimov, V. I., Mikhailovsky, A. A., McBranch, D. W., Leatherdale, C. A., Bawendi, M. G. **Quantization of multiparticle Auger rates in semiconductor quantum dots.** *Science*, 287(5455), 1011–1013, 2000. DOI: 10.1126/science.287.5455.1011.
- [6] Hou, X., Kang, J., Qin, H., Chen, X., Ma, J., Zhou, J., Chen, L., Wang, L. W., Peng, X. **Engineering Auger recombination in colloidal quantum dots via dielectric screening.** *Nature Communications*, 10, 1750, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-09737-2.