

PACS numbers: 71.35.-y, 73.20.Mf, 73.21.La, 78.67.Hc, 81.07.Ta

Определение размеров полупроводниковых квантовых точек новым оптическим методом

С. И. Покутний, А. С. Жабенко, К. Ю. Манило

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

С помощью нового оптического метода, основанного на сравнении теоретических и экспериментальных зависимостей энергетического спектра экситона от радиуса полупроводниковых квантовых точек, определены размеры квантовых точек.

За допомогою нової оптичної методи, що ґрунтується на порівнянні теоретичних та експериментальних залежностей енергетичного спектру екситона від радіуса напівпровідникових квантових точок, визначено розміри квантових точок.

Using a new optical method based on comparison of the theoretical and experimental dependences of the exciton energy spectrum on the radius of semiconductor quantum dots, sizes of quantum dots are determined.

Ключевые слова: полупроводниковые квантовые точки, поляризационное и кулоновское взаимодействие, дисперсия.

(Получено 18 ноября 2011 г.; после доработки — 30 марта 2012 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальной работе [1] исследовались низкотемпературные ($T \leq 80$ К) спектры поглощения квантовых точек (КТ) сульфида кадмия с радиусами a порядка нескольких нм, диспергированных в прозрачной диэлектрической матрице SiO_2 (с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = 1,8$); см. рис. Серии образцов с концентрацией полупроводниковой фазы примерно 23% были получены при разных режимах отжига. В [1] также был исследован спектр исходного не-термообработанного образца (спектр 4).

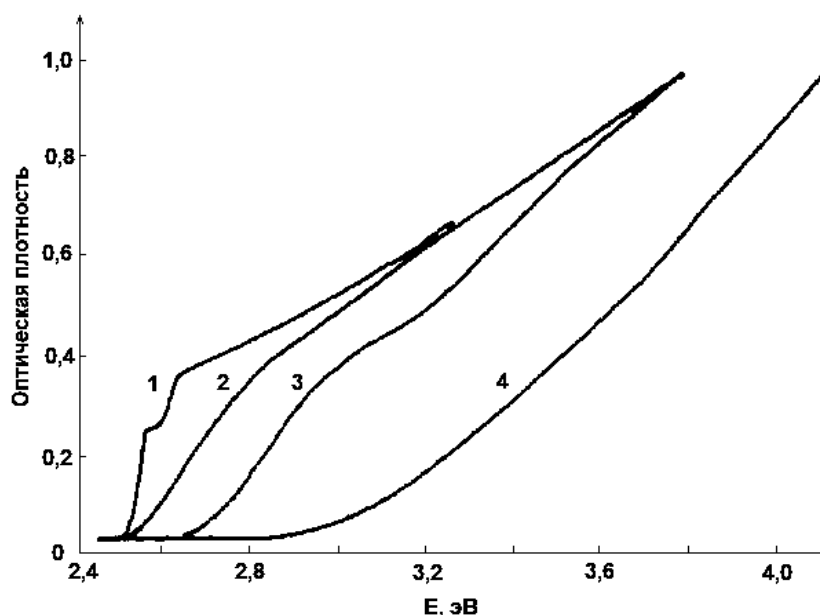


Рис. Низкотемпературные ($T = 80$ К) спектры поглощения полупроводниковых нанокристаллов CdS при различных режимах термообработки плёнки (см. [1]): 1 — 1050°C , 4 ч.; 2 — 900°C , 4 ч.; 3 — 700°C , 30 мин; 4 — нетермообработанный образец.

Наблюдаемый край поглощения в нетермообработанной плёнке SiO_2 авторы [1] связывали с поглощением света КТ CdS. В результате термообработки образцов, в их спектрах наблюдалось дополнительное поглощение в длинноволновой части спектра, край которого сдвигался в коротковолновую сторону при уменьшении температуры отжига (спектры 1–3). Авторы работы [1] предполагали, что это сдвиг обусловлен квантово-размерным эффектом и связан с уменьшением среднего размера a КТ CdS при понижении температуры термообработки.

В настоящей работе с помощью нового оптического метода [2–5], основанного на сравнении теоретических и экспериментальных зависимостей энергетического спектра экситона от радиуса a КТ сульфида кадмия, определены размеры КТ CdS.

2. МОДЕЛЬ. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Рассмотрим простую квазиульмерную наносистему: нейтральная сферическая КТ радиуса a с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 погружена в матрицу боросиликатного стекла с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . Запишем энергетический спектр экситона

$E_{n_e}^{t_h}(S)$, электрон и дырка которого двигаются в объёме КТ радиуса a , в состоянии (n_e, t_h) (где n_e и t_h — главные квантовые числа электрона и дырки соответственно), в таком виде:

$$E_{n_e}^{t_h}(S) - E_g = \frac{\pi^2 n_e^2}{S^2} - \frac{2(\ln(2\pi n_e) + j - \text{Ci}(2\pi n_e))}{S} + \\ + \bar{\omega}(S, n_e)(t_h + 3/2) + \frac{Z_{n_e,0} + \varepsilon_2 / \varepsilon_1 - 1}{S}, \quad (1)$$

В формуле (1) частота осцилляторных колебаний дырки [6]

$$w(S, n_e) = 2(1 + 2/3\pi^2 n_e^2)^{1/2} (m_e / m_h)^{1/2} S^{-3/2} \quad (2)$$

(где m_e и m_h эффективные массы электрона и дырки в полупроводниковом материале, содержащемся в объёме КТ; E_g — ширина запрещённой зоны в КТ); $j = 0,577$ — постоянная Эйлера, $\text{Ci}(y)$ — интегральный косинус, а параметр [6]

$$Z_{n_e,0} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + 2 \int_0^1 \frac{dx \sin^2(\pi n_e x)}{1 - x^2}. \quad (3)$$

Здесь энергия измеряется в единицах $Ry_e = \hbar^2 / (2m_e a_e^2)$ и используется безразмерная величина длины $S = a/a_e$ (где $a_e = \varepsilon_2 \hbar^2 / (m_e e^2)$ — боровский радиус электрона в КТ).

Учёт дисперсии КТ по радиусам a приводит к тому, что в кинетической энергии электрона (первый член в (1)) появляется коэффициент $K = 0,67$ [7], а частота осцилляторных колебаний дырки $\bar{\omega}(S, n_e)$ (2) будет теперь определяться такой формулой:

$$\bar{\omega}(S, n_e) = 2,232 \left(1 + (2/3)\pi^2 n_e^2\right)^{1/2} (m_e / m_h)^{1/2} S^{-3/2}. \quad (4)$$

Кроме того, выполненная в [7] численная обработка результатов рентгеновских измерений с учётом дисперсии по размерам, показала, что среднее по распределению Лифшица–Слёзова [7] значение радиуса КТ $S = \bar{a} / a_e = 0,86S$ (где $S = a / a_e$) — значение радиуса КТ, полученное в монодисперсном приближении. С учётом вышесказанного, спектр экситона (1) в КТ принимает такой вид:

$$E_{n_e}^{t_h}(\bar{S}) - E_g = K \frac{\pi^2 n_e^2}{\bar{S}^2} - \frac{2 \ln(2\pi n_e) + j - (2\pi n_e)}{\bar{S}} + \\ + \bar{\omega}(\bar{S}, n_e)(t_h + 3/2) + \frac{Z_{n_e,0} + \varepsilon_2 / \varepsilon_1 - 1}{\bar{S}}, \quad (5)$$

Спектр экситона (5) применим к условиям эксперимента [1] в области радиусов

$$a < a_e \approx 3,0 \text{ нм.} \quad (6)$$

Предположим, что спектры межзонного поглощения КТ сульфида кадмия, полученные в [1], были обусловлены разрешёнными переходами электрона между краем валентной зоны и основным состоянием ($n_e = 1$, $t_h = 0$) экситона. Из условия экситона [1] следует, что наибольшим размером $\bar{a}$ из всех КТ CdS, имеющих минимальные радиусы $\bar{a}$ (они же являются ответственными за длинноволновый край поглощения в спектрах), обладают КТ, формирующие спектр поглощения образца (спектр 1).

Сравнивая спектр экситона (5) со значением энергии края поглощения $E_1 = 3,27$ эВ в спектре 1, получим минимальный размер КТ $\bar{a}_1 = 2,97$ нм. Отметим, что найденное значение радиуса КТ $\bar{a}_1$ удовлетворяет условию существования (6) спектра экситона (5).

Из условия эксперимента [1] вытекает, что минимальные размеры КТ CdS, поглощение света которыми приводило к формированию спектров (2, 3), были меньше радиуса $\bar{a}_1$. Такие значения радиусов КТ не могут, по-видимому, удовлетворять условию (6) применения спектра экситона (5). В связи с этим, чтобы получить минимальные размеры КТ $\bar{a}$ (для спектров 2, 3), необходимо выполнить сравнение спектра экситона, полученного вариационным методом в работе [8] в условиях эксперимента [1], со значением энергии края поглощения $E_2 = E_3 = 3,77$ эВ. В результате найдём следующие значения для минимальных радиусов КТ сульфида кадмия: $\bar{a}_2 = \bar{a}_3 = 1,45$ нм.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование нового оптического метода [2–5], основанного на сравнении теоретических и экспериментальных зависимостей энергетических спектров экситона a КТ (спектров оптического поглощения нанокристаллов CdS), даёт возможность определить минимальные размеры $\bar{a}$ нанокристаллов CdS, которые ответственны за дополнительное поглощение в длинноволновой части спектра [1].

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. Ф. Гуревич, А. И. Екимов, И. А. Кудрявцев, *ФТП*, **26**, № 1: 102 (1992).
2. А. П. Шпак, С. И. Покутний, *Успехи физ. мет.*, **6**, № 2: 105 (2005).
3. S. I. Pokutnyi, *Ukr. J. Phys. Rev.*, **3**, No. 1: 46 (2006).
4. С. И. Покутний, *ФТП*, **44**, № 4: 507 (2010).
5. S. I. Pokutnyi, *Phys. Express*, **1**, No. 3: 112 (2011).
6. S. I. Pokutnyi, *Phys. Lett. A*, **168**, Nos. 5/6: 433 (1992).
7. А. И. Екимов, А. А. Онущенко, М. Э. Райх, Ал. Л. Эфрос, *ЖЭТФ*, **90**, № 5: 175 (1986).
8. С. И. Покутний, *ФТП*, **41**, № 11: 1323 (2007).