

Энергии связи экситона из пространственно разделенных электрона и дырки в диэлектрических квантовых точках

© С.И. Покутний[†], Ю.Н. Кульчин*, В.П. Дзюба*

[†] Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко Национальной академии наук Украины, 03164 Киев, Украина

* Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690042 Владивосток, Россия

(Получена 16 декабря 2014 г. Принята к печати 25 февраля 2015 г.)

Обнаружен эффект существенного увеличения энергии связи (почти на 2 порядка) основного состояния экситона из пространственно разделенных электрона и дырки (дырка движется в объеме квантовой точки, а электрон локализован над сферической поверхностью раздела (квантовая точка)–(диэлектрическая матрица)) в наносистемах, содержащих диэлектрические квантовые точки оксида алюминия, относительно энергии связи экситона в монокристалле Al_2O_3 . Установлено, что в запрещенной зоне наночастицы Al_2O_3 возникает зона, обусловленная экситонными состояниями (из пространственно разделенных электрона и дырки). Показана возможность по спектрам поглощения наносистемы экспериментально обнаружить при комнатных температурах существование основного и возбужденных экситонных состояний в запрещенной зоне наночастицы Al_2O_3 .

1. Введение

В экспериментальных работах [1–4] исследовались оптические свойства гетерогенных жидких наночастиц композитов на основе широкозонных диэлектрических наночастиц из Al_2O_3 . Уникальность таких наносистем, содержащих наночастицы Al_2O_3 , имеющие широкую запрещенную зону, $E_g = 3.7$ эВ, позволяет по спектрам поглощения и пропускания экспериментально обнаружить при комнатных температурах существование в запрещенной зоне наночастицы энергетических уровней и зон, что приводит к значительному поглощению излучения в видимой и ближней инфракрасной областях длин волн и обуславливает экспериментально наблюдаемое существенное размытие края поглощения [1–5].

Применению наносистем, состоящих из полупроводниковых нанокристаллов сферической формы — так называемых квантовых точек (КТ), — в качестве активной области нанолазеров препятствует малая энергия связи экситона в наносистемах [6,7]. Поэтому исследования, направленные на поиск наногетероструктур, в которых может наблюдаться существенное увеличение энергии связи экситона, являются актуальными.

В настоящей работе обнаружен эффект существенного увеличения (почти на 2 порядка) энергии связи экситона из пространственно разделенных электрона и дырки (дырка движется в объеме КТ, а электрон локализован над сферической поверхностью раздела КТ–матрица) в наносистеме, содержащей диэлектрические наночастицы оксида алюминия, по сравнению с энергией связи экситона в монокристалле Al_2O_3 . Установлено, что в запрещенной зоне наночастицы Al_2O_3 расположена зона, обусловленная экситонными состояниями экситона (из пространственно разделенных электрона и дырки). Показана возможность по спектрам поглощения и про-

пускания наносистемы экспериментально обнаружить при комнатных температурах существование основного и возбужденных экситонных состояний в запрещенной зоне наночастицы Al_2O_3 . Обнаруженный эффект существенного увеличения энергии связи экситона открывает возможность использования диэлектрических наногетероструктур в качестве активной области нанолазеров, работающих на экситонных переходах.

2. Экситон из пространственно разделенных электрона и дырки

Рассмотрим модель квазинульмерной наносистемы [8,9]: сферическую КТ радиуса a , которая содержит в своем объеме диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , окруженную диэлектрической матрицей с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . В объеме КТ движется дырка h с эффективной массой m_h , а электрон e с эффективной массой $m_e^{(1)}$ находится в матрице. В такой наносистеме самый нижний электронный уровень расположен в матрице, а самый нижний дырочный уровень находится в объеме КТ (см. рис. 1). Большой сдвиг валентной зоны (~ 700 мэВ) вызывает локализацию дырок в объеме КТ. Большой сдвиг зоны проводимости (~ 400 мэВ) является потенциальным барьером для электронов (электроны движутся в матрице и не проникают в объем КТ). Энергия кулоновского взаимодействия электрона с дыркой, а также энергия поляризационного взаимодействия электрона с поверхностью раздела КТ–матрица (поскольку ϵ_2 КТ намного превосходит диэлектрическую проницаемость матрицы ϵ_1) вызывает локализацию электрона в потенциальной яме вблизи поверхности КТ (дырка при этом движется в объеме КТ) [1–4,8,9].

Предположим, что на сферической поверхности раздела КТ–матрица существует бесконечно высокий по-

[†] E-mail: pokutnyi_servey@inbox.ru

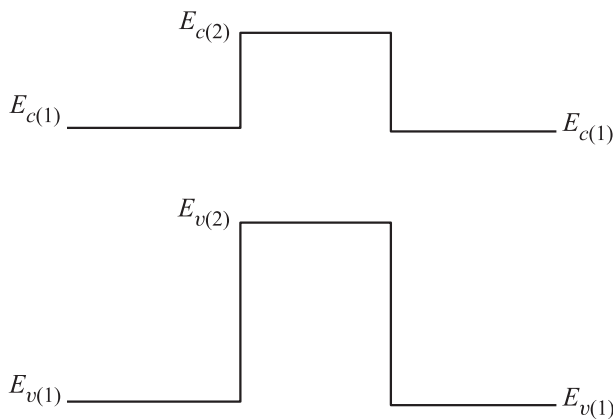


Рис. 1. Зонная схема наногетероструктуры КТ-матрица. В наногетероструктуре КТ является потенциальной ямой для дырки и барьером для электрона. $E_{c(1)}$, $E_{v(1)}$ и $E_{c(2)}$, $E_{v(2)}$ соответственно — положения дна зоны проводимости и потолка валентной зоны в матрице и в КТ.

тениальный барьер. Поэтому в изучаемой модели дырка h не может выйти из объема КТ, а электрон e не может проникнуть в объем КТ. Для простоты, не теряя общности, будем считать, что дырка h расположена в центре КТ. С ростом радиуса a КТ (так, что $a \gg a_{\text{ex}}$, где a_{ex} — боровский радиус экситона в диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ε_2) сферическая поверхность раздела КТ-матрица переходит в плоскую поверхность раздела (диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ε_2)–(матрица с диэлектрической проницаемостью ε_1). Экситон из пространственно разделенных электрона и дырки становится двумерным. Вкладом энергии поляризационного взаимодействия электрона и дырки с поверхностью КТ в гамильтониан экситона в первом приближении можно пренебречь. Поэтому в потенциальной энергии гамильтониана экситона остается только энергия кулоновского взаимодействия электрона с дыркой:

$$V_{eh}(r) = -[(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)/2\varepsilon_1\varepsilon_2](e^2/r), \quad (1)$$

где r — расстояние до электрона от центра КТ. Уравнение Шредингера с таким гамильтонианом описывает двумерный экситон из пространственно разделенных электрона и дырки (электрон движется в матрице с ε_1 , а дырка — в диэлектрике с ε_2), энергетический спектр которого имеет вид [10,11]

$$E_n^{2D} = -\frac{\text{Ry}_{\text{ex}}^{2D}}{(n + 1/2)^2}, \quad \text{Ry}_{\text{ex}}^{2D} = \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2\varepsilon_1\varepsilon_2}\right)^2 \left(\frac{\mu_0}{m_0}\right) \text{Ry}_0, \quad (2)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ — главное квантовое число экситона, $\mu_0 = m_e^{(1)}m_h/(m_e^{(1)} + m_h)$ — приведенная масса экситона, $\text{Ry}_0 = 13.606$ эВ — постоянная Ридберга. Боровский радиус (a_{ex}^{2D}) и энергия связи (E_{ex}^{2D}) основного состояния

такого двумерного экситона, согласно (2), принимают вид

$$a_{\text{ex}}^{2D} = [2\varepsilon_1\varepsilon_2/(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)](\hbar^2/\mu_0e^2), \quad (3)$$

$$E_{\text{ex}}^{2D} = -4\text{Ry}_{\text{ex}}^{2D}. \quad (4)$$

При этом энергия связи E_{ex}^{2D} (4) основного состояния двумерного экситона (из пространственно разделенных электрона и дырки)

$$E_{\text{ex}}^{2D} = [1 + (\varepsilon_2/\varepsilon_1)]^2(\mu_0/\bar{\mu})E_{\text{ex}}^{3D} \quad (5)$$

в $[1 + (\varepsilon_2/\varepsilon_1)]^2(\mu_0/\bar{\mu})$ раз больше энергии связи

$$E_{\text{ex}}^{3D} = -(\bar{\mu}/m_0)\varepsilon_2^{-2}\text{Ry}_0 \quad (6)$$

основного состояния трехмерного экситона (где $\bar{\mu}$ — приведенная масса экситона в диэлектрике с ε_2).

3. Энергия основного состояния экситона

Найдем полную энергию $E_0(a)$, а также энергию связи $E_{\text{ex}}(a)$ основного состояния экситона в наносистеме вариационным методом. Вариационную радиальную волновую функцию основного состояния экситона ($1s$ -состояния электрона и $1s$ -состояния дырки) в наносистеме запишем в виде [8,9]

$$\Psi(r, a) = A(r/a) \exp\{-[\mu(a)/\mu_0]/(r/a_{\text{ex}}^{2D})\}, \quad (7)$$

где A — нормировочный коэффициент, а приведенная масса экситона $\mu(a)$ является вариационным параметром. Энергия связи $E_{\text{ex}}(a)$ основного состояния экситона в такой наносистеме определяется выражением [8,9]

$$E_{\text{ex}}(a) = E_0(a) - \langle \Psi(r, a) | [V_{hh'}(a) + V_{ee'}(r, a)] | \Psi(r, a) \rangle, \quad (8)$$

где $\langle \Psi(r, a) | [V_{hh'}(a) + V_{ee'}(r, a)] | \Psi(r, a) \rangle$ описывает средние значения энергий взаимодействия дырки, $V_{hh'}$, и электрона, $V_{ee'}$, со своими изображениями на вариационных функциях (7). Поскольку величины средних энергий взаимодействия дырки и электрона со своими изображениями вносят в энергию связи экситона $E_{\text{ex}}(a)$ (8) вклады с разными знаками, то они в значительной степени компенсируются между собой. Поэтому значения энергии связи $E_{\text{ex}}(a)$ (8) основного состояния экситона слабо отличаются от соответствующих значений полной энергии $E_0(a)$ основного состояния экситона в таких наносистемах.

Результаты вариационного расчета полной энергии $E_0(a)$ и энергии связи $E_{\text{ex}}(a)$ (8) основного состояния экситона (из пространственно разделенных электрона и дырки) здесь получены (см. рис. 2) для наносистемы (которая исследовалась в условиях экспериментов [1]), содержащей КТ оксида алюминия (с $\varepsilon_2 = 10$ и эффективной массой дырки $m_h/m_0 = 6.2$), помещенные в матрицу

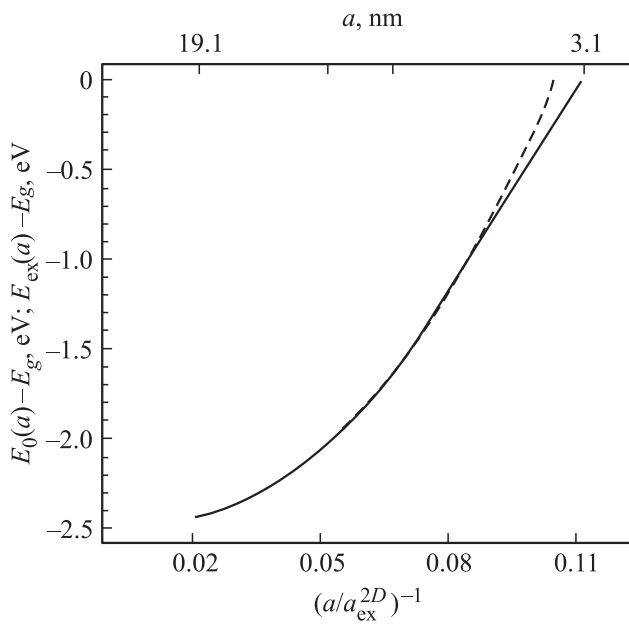


Рис. 2. Зависимость энергии основного состояния экситона $E_0(a) - E_g$ в (8) (сплошная линия), а также энергии связи основного состояния экситона $E_{ex}(a) - E_g$ (8) (штриховая) от радиуса a КТ оксида алюминия. Параметры расчета: $E_g = 3.7$ эВ — ширина запрещенной зоны в КТ Al_2O_3 , $E_{ex}^{2D} = 2.5038$ эВ (4) и $a_{ex}^{2D} = 0.352$ нм (3) — энергия связи основного состояния и боровский радиус двумерного экситона (из пространственно разделенных электрона и дырки).

вакуумного масла ВМ-4 ($\epsilon_1 = 1.96$, значение эффективной массы электрона в матрице было вычислено в [12] и равнялось $m_e^{(1)}/m_0 = 0.537$), с радиусами КТ в интервале

$$3.1 \leq a \leq 19.1 \text{ нм.} \quad (9)$$

Из рис. 2, на котором приведены зависимости полной энергии $E_0(a)$ и энергии связи $E_{ex}(a)$ (8) основного состояния экситона (из пространственно разделенных электрона и дырки) в наносистеме, содержащей наночастицы Al_2O_3 радиуса a (9), следует, что связанные состояния электронно-дырочной пары возникают вблизи сферической поверхности наночастицы начиная со значения критического радиуса наночастицы $a \geq a_c^{(1)} \approx 3.1$ нм. Состояния электронно-дырочной пары начиная с радиуса наночастицы $a \geq a_c^{(1)}$ находятся в области отрицательных энергий (отсчитанных от потолка запрещенной зоны $E_g = 3.7$ эВ наночастицы Al_2O_3), что соответствует связанному состоянию электрона и дырки. В этом случае энергия кулоновского взаимодействия $V_{eh}(r)$ (1) между электроном и дыркой, а также энергия поляризационного взаимодействия электрона и дырки со сферической поверхностью раздела наночастица–матрица преобладают над энергией размерного квантования электрона и дырки в наносистеме.

С ростом радиуса наночастицы a наблюдается увеличение полной энергии $|E_0(a)|$ в (8), а также энергии связи $E_{ex}(a)$ (8) основного состояния экситона (из

пространственно разделенных электрона и дырки) в наносистеме. В интервале радиусов КТ (9) энергия связи основного состояния экситона $E_{ex}(a)$ в (8) существенно, в 3–49 раз, превышает значение энергии связи экситона в монокристалле Al_2O_3 $E_{ex}^{3D} = 51.16$ мэВ (6). Начиная с радиуса КТ $a \geq a_c^{(2)} \approx 19.1$ нм значения полной энергии (8), а также энергии связи (8) основного состояния экситона в наносистеме, асимптотически следуют к значению $E_{ex}^{2D} = -2.5038$ эВ (4), характеризующему энергию связи основного состояния двумерного экситона (из пространственно разделенных электрона и дырки) (см. рис. 2).

Эффект существенного увеличения энергии связи основного состояния экситона в наносистеме $E_{ex}(a)$, согласно формулам (2), (4)–(6), определяется в основном двумя факторами: 1) существенным увеличением энергии кулоновского взаимодействия $|V_{eh}(r)|$ (1) электрона с дыркой (эффект „диэлектрического усиления“ [13]); 2) пространственным ограничением области квантования объемом наночастицы, при этом с увеличением радиуса наночастицы начиная с $a \gtrsim a_c^{(2)} \approx 19.1$ нм экситон в наносистеме становится двумерным с энергией связи основного состояния E_{ex}^{2D} (4), значение которой существенно превышает (почти на 2 порядка) энергию связи экситона E_{ex}^{3D} (6) в монокристалле Al_2O_3 .

Эффект „диэлектрического усиления“ обусловлен тем, что в случае, когда диэлектрическая проницаемость матрицы значительно меньше диэлектрической проницаемости наночастицы, т. е. $\epsilon_1 \ll \epsilon_2$, существенную роль во взаимодействии между электроном и дыркой в наносистеме играет поле, создаваемое этими квазичастицами в матрице. При этом взаимодействие между электроном и дыркой в наносистеме оказывается значительно больше, чем в диэлектрике с ϵ_2 [13].

4. Сравнение теории с экспериментами

В экспериментальных работах [1–4] исследовались оптические свойства гетерогенных жидких нанофазных композитов на основе широкозонных диэлектрических наночастиц из Al_2O_3 (помещенных в матрицу вакуумного масла ВМ-4) со средними радиусами, не превышающими $a = 25$ нм. В таких наноструктурах при малых концентрациях наночастиц (0.03%) взаимодействием между наночастицами можно пренебречь. Оптические свойства таких наносистем в основном определялись энергетическими спектрами электрона и дырки, локализованных вблизи поверхности одиночных наночастиц, помещенных в диэлектрические матрицы [1–5,8,9]. В [1] установлено, что наночастицы Al_2O_3 в матрице вакуумного масла имели широкую полосу поглощения (от 1.4 до 3.7 эВ). В [1] в запрещенной зоне наночастицы также обнаружен уровень донорного типа с энергией $E_d = -2.3$ эВ наночастицы относительно дна зоны проводимости и шириной 0.3–0.4 эВ.

Для интерпретации результатов экспериментов [1] будем считать, что наночастицы имеют сферическую форму. Поскольку в условиях экспериментов [1] средние радиусы a наночастиц не превышали 25 нм, то, как следует из результатов вариационного расчета энергии основного состояния экситона $E_0(a)$ (8) в наносистеме, содержащей наночастицы Al_2O_3 , при изменении радиусов a КТ в интервале (9) (см. рис. 2) в запрещенной зоне наночастицы оксида алюминия возникает зона экситонных состояний (из пространственно разделенных электрона и дырки) с шириной, не превышающей $E_{\text{ex}}^{2D} = E_{\text{ex}}^{(0)} = 2.5038$ эВ, расположенная у дна зоны проводимости (см. рис. 3). При этом уровень $E_d = -2.3$ эВ (шириной 0.3–0.4 эВ, экспериментально обнаруженный в [1]) попадает в эту экситонную зону наночастицы оксида алюминия. Значительный интервал (от 1.4 эВ до $E_{\text{ex}}^{2D} = E_{\text{ex}}^{(0)} = 2.5038$ эВ) полосы поглощения, которая наблюдалась в [1], также попадает в зону экситонных состояний наночастицы оксида алюминия (см. рис. 3). Переходы электрона в такой зоне экситонных состояний вызывают значительное поглощение излучения в видимой и ближней инфракрасной областях длин волн и обуславливают экспериментально наблюдаемое существенное размытие края поглощения [1–4,14].

На рис. 3 изображена диаграмма энергетических уровней двумерного экситона (из пространственно разделенных электрона и дырки) в наносистеме. Стрелками показаны переходы электрона, разрешенные правилами отбора, между уровнями двумерного экситона в наносистеме. Энергии таких переходов определяются формулой (2): 1 соответствует переходу электрона между уровнем основного состояния ($n = 0$) экситона $E_{\text{ex}}^{(0)}$ и дном зоны проводимости E_c (энергия такого перехода $\Delta E_{0c} = E_{\text{ex}}^{(0)} = E_{\text{ex}}^{2D} = 2.5038$ эВ); 2 — переход электрона между первым возбужденным ($n = 1$) уровнем экситона $E_{\text{ex}}^{(1)}$ и дном зоны проводимости E_c (энергия такого перехода $\Delta E_{1c} = E_{\text{ex}}^{(1)} = E_{\text{ex}}^{(0)}/9 = 0.278$ эВ); 3 — соответствует переходу электрона между вторым возбужденным ($n = 2$) уровнем экситона $E_{\text{ex}}^{(2)}$ и дном зоны проводимости E_c (энергия такого перехода $\Delta E_{2c} = E_{\text{ex}}^{(2)} = E_{\text{ex}}^{(0)}/25 = 0.10$ эВ); 4 — переход электрона между основным $E_{\text{ex}}^{(0)}$ и первым возбужденным $E_{\text{ex}}^{(1)}$ уровнями экситона (энергия такого перехода $\Delta E_{01} = E_{\text{ex}}^{(1)} - E_{\text{ex}}^{(0)} = (8/9)E_{\text{ex}}^{(0)} = 2.226$ эВ), 5 соответствует переходу электрона между основным $E_{\text{ex}}^{(0)}$ и вторым возбужденным $E_{\text{ex}}^{(2)}$ уровнями экситона (энергия такого перехода $\Delta E_{02} = (24/25)E_{\text{ex}}^{(0)} = 2.404$ эВ); 6 — переход электрона между первым $E_{\text{ex}}^{(1)}$ и вторым $E_{\text{ex}}^{(2)}$ возбужденными уровнями экситона (энергия такого перехода $\Delta E_{12} = (16/225)E_{\text{ex}}^{(0)} = 0.178$ эВ). Следует отметить, что переходы электрона между уровнями двумерного экситона в наносистеме (см. рис. 3) вызывают поглощение и излучение квантов энергии в видимой и ближней инфракрасной областях.

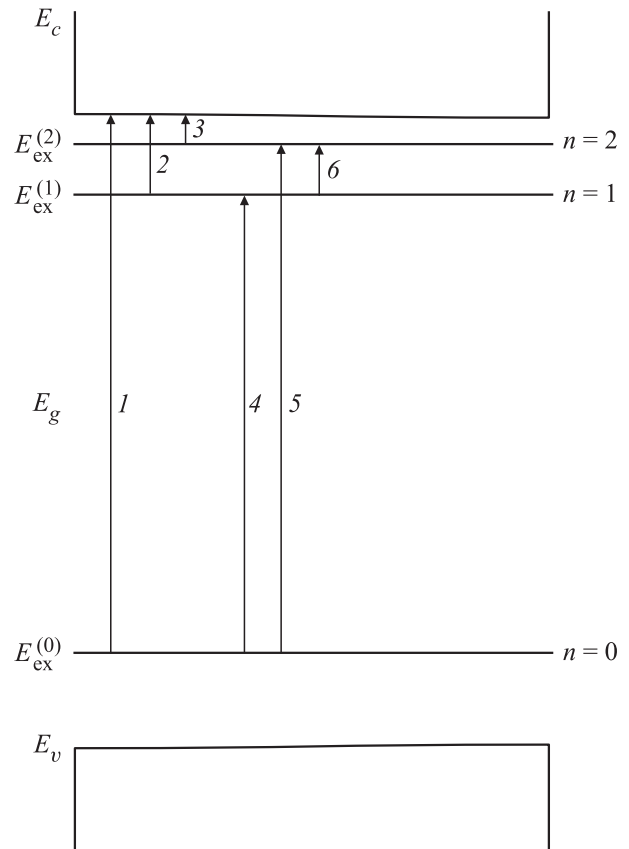


Рис. 3. Диаграмма энергетических уровней двумерного экситона (из пространственно разделенных электрона и дырки) в наносистеме. Стрелками показаны переходы электрона, разрешенные правилами отбора, между уровнями двумерного экситона в наносистеме: 1 — переход электрона между уровнем основного состояния ($n = 0$) экситона $E_{\text{ex}}^{(0)}$ и дном зоны проводимости E_c^- , энергия перехода $\Delta E_{0c} = E_{\text{ex}}^{2D} = 2.5038$ эВ; 2 — переход электрона между первым возбужденным ($n = 1$) уровнем экситона $E_{\text{ex}}^{(1)}$ и дном зоны проводимости E_c , энергия перехода $\Delta E_{1c} = E_{\text{ex}}^{(1)} = E_{\text{ex}}^{(0)}/9$; 3 — переход электрона между вторым возбужденным ($n = 2$) уровнем экситона $E_{\text{ex}}^{(2)}$ и дном зоны проводимости E_c , энергия перехода $\Delta E_{2c} = E_{\text{ex}}^{(2)} = E_{\text{ex}}^{(0)}/25 = 0.10$ эВ; 4 — переход электрона между основным $E_{\text{ex}}^{(0)}$ и первым возбужденным $E_{\text{ex}}^{(1)}$ уровнями экситона, энергия перехода $\Delta E_{01} = E_{\text{ex}}^{(1)} - E_{\text{ex}}^{(0)} = (8/9)E_{\text{ex}}^{(0)} = 2.226$ эВ; 5 — переход электрона между основным $E_{\text{ex}}^{(0)}$ и вторым возбужденным $E_{\text{ex}}^{(2)}$ уровнями экситона, энергия перехода $\Delta E_{02} = (24/25)E_{\text{ex}}^{(0)} = 2.404$ эВ; 6 — переход электрона между первым $E_{\text{ex}}^{(1)}$ и вторым $E_{\text{ex}}^{(2)}$ возбужденными уровнями экситона, энергия перехода $\Delta E_{12} = (16/225)E_{\text{ex}}^{(0)} = 0.178$ эВ.

Уникальность диэлектрических наночастиц оксида алюминия, состоящая в наличии широкой запрещенной зоны, $E_g = 3.7$ эВ, дает возможность по спектрам поглощения и пропускания изучаемых здесь наносистем экспериментально обнаружить при комнатных температурах существование экситонных состояний (основного,

$n = 0$, и возбужденных, $n = 1$ и $n = 2$) (см. рис. 3). Это обстоятельство позволит, по-видимому, впервые развить теоретическую и экспериментальную спектроскопию экситонных состояний (из пространственно разделенных электрона и дырки) в наногетеросистемах, содержащих диэлектрические наночастицы оксида алюминия.

5. Заключение

Для применения наногетеросистем, содержащих диэлектрические КТ оксида алюминия в качестве активной области нанолазеров, необходимо, чтобы энергия связи экситона $|E_{ex}(a)|$ (8) в наносистеме была порядка нескольких kT_0 при комнатной температуре T_0 (k — постоянная Больцмана) [7]. В качестве активной области нанолазеров на КТ можно использовать наносистемы, состоящие из диэлектрических КТ оксида алюминия, выращенных в диэлектрических матрицах [1–5]. В интервале радиусов a (9) КТ Al_2O_3 параметр $|E_{ex}(a)/kT_0|$ принимает существенные значения, находящиеся в интервале от 3.2 до 48.

Указанная здесь возможность по спектрам поглощения и пропускания наносистем экспериментально обнаружить существование экситонных состояний (основного, $n = 0$, и возбужденных, $n = 1$ и $n = 2$) при комнатной температуре позволяет, по-видимому, впервые развить теоретическую и экспериментальную спектроскопию экситонных состояний (из пространственно разделенных электрона и дырки) в наногетеросистемах, содержащих диэлектрические наночастицы оксида алюминия.

Изменяя параметры наногетероструктур, содержащих диэлектрические наночастицы оксида алюминия (радиус a КТ, диэлектрические проницаемости КТ и матрицы, а также отношение эффективных масс квазичастиц $m_h/m_{e(1)}$), можно направленно варьировать положения энергетических уровней экситона, энергии связи экситона, ширины экситонных зон, а также энергии экситонных переходов в экситонных зонах. Последнее обстоятельство, по-видимому, открывает новые возможности в использовании таких наногетероструктур в качестве активной области нанолазеров.

Список литературы

- [1] Ю.Н. Кульчин, А.В. Щербаков, В.П. Дзюба. Квант. электрон., **38** (2), 154 (2008).
- [2] V.P. Dzyuba, Yu.N. Kulchin, V.A. Milichko. J. Nanoparticle Research, **14** (8), 1208 (2012).
- [3] Yu.N. Kulchin, V.P. Dzyuba, V.A. Milichko. Adv. Mater. Res. A, **677**, 36 (2013).
- [4] Yu.N. Kulchin, V.P. Dzyuba, V.A. Milichko. Adv. Mater. Res. A, **677**, 42 (2013).
- [5] V.P. Dzyuba, Yu.N. Kulchin, S.I. Pokutnyi. Optics. Special Issue: Optics and spectroscopy of the charge carriers and exciton states in quasi-zero-dimensional nanostructures, **3** (6-1), 22 (2014).
- [6] Ж.И. Алферов. УФН, **172** (9), 1068 (2002).
- [7] S.I. Pokutnyi. Phys. Lett. A, **342** (5), 347 (2005).
- [8] С.И. Покутний. ФТП, **47** (6), 780 (2013).
- [9] С.И. Покутний. Письма ЖЭТФ, **39** (5), 11 (2013).
- [10] В.Л. Гинзбург, В.В. Келле. Письма ЖЭТФ, **17**, 428 (1973).
- [11] Ю.Е. Лозовик, В.Н. Нишанов. ФТТ, **18** (11), 3267 (1976).
- [12] S.I. Pokutnyi. Phys. Lett. A, **203** (5), 388 (1995).
- [13] Л.В. Келдыш. Письма ЖЭТФ, **29** (11), 776 (1979).
- [14] О.П. Михеева, А.И. Сидоров. ЖТФ, **74** (1), 77 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

Exciton binding energy formed from spatially separated electron and hole in dielectric quantum dots

S.I. Pokutnyi⁺, Yu.N. Kulchin*, V.P. Dzyuba*

⁺ Chuiko Institute of Surface Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, 03164 Kyiv, Ukraine

* Institute of Automation and Control Processes, Far-East Branch of Russian Academy of Sciences, 690042 Vladivostok, Russia

Abstract The effect of a significant increase (almost two orders of magnitude) in the binding energy of the exciton ground state of the spatially separated electrons and holes (the hole moves in the volume of the quantum dot and the electron is localized on the spherical surface section (quantum dot)–(dielectric matrix)) in nanosystems dielectric quantum dots Al_2O_3 with respect to the exciton binding energy in a single crystal Al_2O_3 . Such an effect of increasing the exciton binding energy opens up the possibility of using nanostructures as active region nanolasers working on excitonic transitions. It is shown that the band gap Al_2O_3 nanoparticles zone arises due to exciton states (of spatially separated electrons and holes).