

# Экситоны с пространственно разделенными электронами и дырками в гетероструктуре Ge/Si с квантовыми точками германия

С.И. Покутний

*Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко НАНУ, ул. Генерала Наумова, 17, г. Киев, 03164, Украина*  
E-mail: pokutnyi\_serгей@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2016 г., после переработки 6 июня 2016 г.,  
опубликована онлайн 24 октября 2016 г.

Обнаружен эффект существенного увеличения энергии связи экситона с пространственно разделенными электроном и дыркой (дырка движется в объеме квантовой точки, а электрон локализован над сферической поверхностью раздела квантовая точка–матрица) в наносистеме, содержащей квантовые точки германия, выращенные в матрице кремния, по сравнению с энергией связи экситона в монокристалле кремния. Установлено, что в такой наносистеме в зоне проводимости матрицы кремния сначала возникает зона состояний электронно-дырочной пары, которая с ростом радиуса квантовой точки переходит в зону экситонных состояний, расположенную в запрещенной зоне матрицы кремния. Показано, что механизмы поглощения света в наносистеме обусловлены переходами электрона между квантоворазмерными уровнями электронно-дырочной пары, а также переходами электрона между квантоворазмерными экситонными уровнями.

Виявлено ефект суттєвого збільшення енергії зв'язку екситона з просторово розділеними електроном і діркою (дірка рухається в об'ємі квантової точки, а електрон локалізований над сферичною поверхнею розділу квантова точка–матриця) в наносистемі, що містить квантові точки германію, вирощені в матриці кремнію, в порівнянні з енергією зв'язку екситона в монокристалі кремнію. Встановлено, що в такій наносистемі в зоні провідності матриці кремнію спочатку виникає зона станів електронно-діркової пари, яка із ростанням радіуса квантової точки переходить в зону екситонних станів, розташовану в забороненій зоні матриці кремнію. Показано, що механізми поглинання світла в наносистемі обумовлені переходами електрона між квантоворозмірними рівнями електронно-діркової пари, а також переходами електрона між квантоворозмірними екситонними рівнями.

PACS: 73.21.–b Электронные состояния и коллективные возбуждения в многослойных структурах, квантовых ямах, мезоскопических и наноразмерных системах.

Ключевые слова: экситон с пространственно разделенными электроном и дыркой, энергия связи, квантовые точки.

## Введение

В настоящее время интенсивно исследуются оптические свойства гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками (КТ) германия. Такие наногетероструктуры перспективны для создания новых элементов кремниевой оптоэлектроники [1–5]. В гетероструктурах Ge/Si перспективными для реализации эффективных источников излучения инфракрасного диапазона являются структуры с самоформирующимися Ge/Si nanoостровками, поскольку сигнал фотолюминесценции таких наноструктур

в спектральной области 0,25–1,14 эВ наблюдался вплоть до комнатной температуры [1–4]. Для создания на основе Ge/Si гетероструктур новых эффективных оптоэлектронных устройств необходимо изучение механизмов поглощения света в таких наногетероструктурах.

Наногетероструктуры Ge/Si с КТ германия относятся к гетероструктурам второго типа. Такие наногетеросистемы характеризуются наличием значительных разрывов в валентной зоне и в зоне проводимости. В них основной электронный уровень расположен в матрице кремния, а основной дырочный уровень находится

в объеме КТ германия. Существенный разрыв в валентной зоне вызывает локализацию дырок в объеме КТ. Значительный разрыв в зоне проводимости является потенциальным барьером для электронов (электроны движутся в матрице и не проникают в объем КТ) [1–4].

При исследовании оптических свойств наногетероструктур Ge/Si с КТ германия в экспериментальной работе [1] впервые было обнаружено пространственное разделение электронов и дырок, в результате которого электроны локализовались над поверхностью КТ, а дырки двигались в объеме КТ.

В [6,7] нами обнаружен эффект существенного увеличения энергии связи экситона (почти на два порядка) с пространственно разделенными электроном и дыркой (дырка движется в объеме КТ, а электрон локализован над сферической поверхностью раздела КТ–матрица) в наносистемах, содержащих полупроводниковые и диэлектрические КТ, по сравнению с энергией связи экситона в соответствующих монокристаллах. Такой эффект существенного увеличения энергии связи экситона открывает возможность использования наногетероструктур в качестве активной области нанолазеров, работающих на экситонных переходах при комнатных температурах.

В настоящем сообщении обнаружен эффект существенного увеличения энергии связи экситона с пространственно разделенными электроном и дыркой (дырка движется в объеме КТ, а электрон локализован над сферической поверхностью раздела КТ–матрица) в наносистеме, содержащей КТ германия, выращенные в матрице кремния, по сравнению с энергией связи экситона в монокристалле кремния. Установлено, что в такой наносистеме в зоне проводимости кремния сначала возникает зона состояний электронно-дырочной пары электрона и дырки с кулоновским взаимодействием. С ростом радиуса КТ зона состояний электронно-дырочной пары переходит в зону экситонных состояний, расположенную в запрещенной зоне матрицы кремния. Показано, что механизмы поглощения света в наносистеме обусловлены внутризонными переходами электрона между квантоворазмерными уровнями электронно-дырочной пары и переходами электрона между квантоворазмерными экситонными уровнями, а также межзонными переходами электрона между квантоворазмерным уровнем дырки и квантоворазмерными уровнями электронно-дырочной пары и межзонными переходами электрона между квантоворазмерным уровнем дырки и квантоворазмерными экситонными уровнями.

**Спектроскопия экситона с пространственно разделенными электроном и дыркой в квазиульмерных наносистемах**

Рассмотрим модель квазиульмерной наносистемы — сферическую КТ радиуса  $a$ , которая содержит в своем объеме германий с диэлектрической про-

цаемостью  $\epsilon_2 = 16,3$ , окруженную матрицей кремния с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1 = 11,7$ . В объеме КТ движется дырка  $h$  с эффективной массой  $m_h/m_0 = 0,39$ , а электрон  $e$  с эффективной массой  $m_e^{(1)}/m_0 = 0,98$  находится в матрице кремния ( $m_0$  — масса свободного электрона,  $r_e$  и  $r_h$  — расстояния электрона и дырки от центра КТ). В такой наносистеме основной электронный уровень расположен в матрице, а основной дырочный уровень находится в объеме КТ. Упругие напряжения, возникающие в результате рассогласования по постоянным решетки германия и кремния, вызывают сдвиги зон проводимости и валентных зон в гетероструктуре Ge/Si [1–4]. Существенный сдвиг потолка валентной зоны ( $\Delta E_{v(\text{Ge})} = 610$  мэВ) КТ германия (относительно потолка валентной зоны матрицы кремния) вызывает локализацию дырок в объеме КТ. Значительный сдвиг дна зоны проводимости ( $\Delta E_{c(\text{Si})} = 340$  мэВ) матрицы кремния (относительно дна зоны проводимости КТ германия) в гетероструктуре является потенциальным барьером для электронов (электроны движутся в матрице и не проникают в объем КТ) [1–4]. Энергия кулоновского взаимодействия электрона с дыркой вызывает локализацию электрона в потенциальной яме над поверхностью КТ [6,7].

В изучаемой модели квазиульмерной наноструктуры, в рамках вышеизложенных приближений, а также в приближении эффективной массы, с использованием системы триангулярных координат  $r_e = |\mathbf{r}_e|$ ,  $r_h = |\mathbf{r}_h|$ ,  $r = |\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_h|$  с началом в центре КТ [9,10], гамильтониан экситона (с пространственно разделенными дыркой, движущейся в объеме КТ, и электроном, находящемся в матрице) принимает вид [6]

$$\begin{aligned}
 H(r_e, r_h, r, a) = & -\frac{\hbar^2}{2m_e^{(1)}} \left( \frac{\partial^2}{\partial r_e^2} + \frac{2}{r_e} \frac{\partial}{\partial r_e} + \frac{r_e^2 - r_h^2 + r^2}{r_e r} \frac{\partial^2}{\partial r_e \partial r} \right) - \\
 & -\frac{\hbar^2}{2m_h} \left( \frac{\partial^2}{\partial r_h^2} + \frac{2}{r_h} \frac{\partial}{\partial r_h} + \frac{r_h^2 - r_e^2 + r^2}{r_h r} \frac{\partial^2}{\partial r_h \partial r} \right) - \\
 & -\frac{\hbar^2}{2\mu_0} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) + \\
 & + V_{eh}(r) + V_e(r_e) + V_h(r_h) + (E_{g(\text{Ge})} - \Delta E_{c(\text{Si})}), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где первые три члена — операторы кинетической энергии электрона, дырки и экситона (с пространственно разделенными дыркой и электроном),  $E_{g(\text{Ge})}$  — ширина запрещенной зоны германия,  $\mu_0 = m_e^{(1)}m_h/(m_e^{(1)} + m_h)$  — приведенная масса экситона (с пространственно разделенными дыркой и электроном).

Вкладом энергии поляризационного взаимодействия электрона и дырки с поверхностью КТ, которая описывается выражениями, полученными в [6,8], в

гамильтониан экситона в первом приближении можно пренебречь (поскольку диэлектрические проницаемости КТ и матрицы отличаются между собой незначительно). Поэтому в потенциальной энергии гамильтониана экситона (1) остается только энергия кулоновского взаимодействия электрона с дыркой  $V_{eh}(r)$ , которая имеет вид [6]

$$V_{eh}(r) = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \right) \frac{e^2}{r}. \quad (2)$$

В гамильтониане (2) потенциалы

$$V_h(r_h) = \begin{cases} 0, & r_h \leq a \\ \infty, & r_h > a \end{cases}, \quad (3)$$

$$V_e(r_e) = \infty, \quad r_e \leq a$$

описывают движение квазичастиц в наносистеме с помощью модели бесконечно глубокой потенциальной ямы.

С ростом радиуса КТ (так, что  $a \gg a_{ex}$ , где  $a_{ex} = \epsilon_2 \hbar^2 / \mu e^2$  — боровский радиус экситона в германии,  $\mu = m_e^{(2)} m_h / (m_e^{(2)} + m_h)$  — приведенная масса экситона и  $m_e^{(2)}$  — эффективная масса электрона в германии) сферическая поверхность раздела КТ–матрица переходит в плоскую поверхность раздела. Экситон с пространственно разделенными электроном и дыркой становится двумерным. Уравнение Шредингера с гамильтонианом (1) описывает двумерный экситон с пространственно разделенными электроном и дыркой, энергетический спектр которого имеет вид [11]

$$E_n^{2D} = -\frac{Ry_{ex}^{2D}}{(n + 1/2)^2}, \quad Ry_{ex}^{2D} = \left( \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2\epsilon_1\epsilon_2} \right)^2 \left( \frac{\mu_0}{m_0} \right) Ry_0, \quad (4)$$

где  $n = 0, 1, 2, \dots$  — главное квантовое число экситона,  $Ry_0 = 13,606$  эВ — постоянная Ридберга. Боровский радиус и энергия связи основного состояния такого двумерного экситона, согласно (4), принимают вид

$$a_{ex}^{2D} = \frac{2\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \frac{\hbar^2}{\mu_0 e^2}, \quad (5)$$

$$E_{ex}^{2D} = -4Ry_{ex}^{2D}. \quad (6)$$

При этом энергия связи  $E_{ex}^{2D}$  (6) основного состояния двумерного экситона (с пространственно разделенными электроном и дыркой):

$$E_{ex}^{2D} = [1 + (\epsilon_2/\epsilon_1)]^2 (\mu_0/\mu) E_{ex}^{3D} \quad (7)$$

в  $[1 + (\epsilon_2/\epsilon_1)]^2 (\mu_0/\mu)$  раз больше энергии связи

$$E_{ex}^{3D} = -(\mu/m_0) \epsilon_2^{-2} Ry_0 \quad (8)$$

основного состояния трехмерного экситона (где  $\mu$  — приведенная масса экситона в полупроводнике с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ ).

Полную энергию  $E_0(a)$  основного состояния экситона в наносистеме найдем вариационным методом. Вариационную радиальную волновую функцию основного состояния экситона (1s-состояния электрона и 1s-состояния дырки) в наносистеме запишем в виде [6,7]

$$\Psi_0(r_e, r_h, r, a) = A(r/a) \exp \left[ -(\mu(a)/\mu_0) (r/a_{ex}^{2D}) \right] \times \\ \times j_0(\pi r_h/a_{ex}^{2D}) \exp(-r_e/a_{ex}^{2D}). \quad (9)$$

Здесь нормировочный коэффициент  $A$  определяется из условия нормировки волновой функции экситона (9)

$$\int_a^\infty r_e dr_e \int_0^a r_h dr_h \Psi_0^2(r_e, r_h, r, a) r dr = 1,$$

приведенная масса экситона  $\mu(a)$  — вариационный параметр,  $j_0(\pi r_h/a_{ex}^{2D})$  — сферическая функция Бесселя.

Функция (9) является огибающей волновой функцией, описывающей относительное движение электрона и дырки в экситоне (с пространственно разделенными электроном и дыркой). С ростом радиуса КТ (так, что  $a \gg a_{ex}$ ) в наносистеме возникает двумерный экситон. Это обстоятельство приводит к тому, что вариационная волновая функция экситона (9) содержит собственную волновую функцию двумерного экситона Ванье–Мотта [9]. С уменьшением радиуса КТ (так, что  $a \ll a_{ex}$ ) энергия размерного квантования дырки в КТ будет велика по сравнению с энергией кулоновского взаимодействия  $V_{eh}(r)$  (2) электрона с дыркой. Поэтому в вариационную волновую функцию экситона (9) входит волновая функция дырки, которая движется в сферической потенциальной яме (3) бесконечной глубины. Также вариационная волновая функция экситона (9) содержит собственную волновую функцию электрона кулоновского вида, движущегося над поверхностью КТ.

Поскольку в наносистеме вкладом энергии поляриционного взаимодействия электрона и дырки с поверхностью КТ в гамильтониан экситона (1) пренебрегаем, значения энергии связи  $E_{ex}(a)$  основного состояния экситона слабо отличаются от соответствующих значений полной энергии  $E_0(a)$  основного состояния экситона в таких наносистемах [6,7]. Результаты вариационного расчета полной энергии  $E_0(a)$  (и энергии связи  $E_{ex}(a)$ ) основного состояния экситона (с пространственно разделенными электроном и дыркой) приведены (см. рис. 1) для наносистемы, исследованной в условиях экспериментов [1–4], которая содержа-

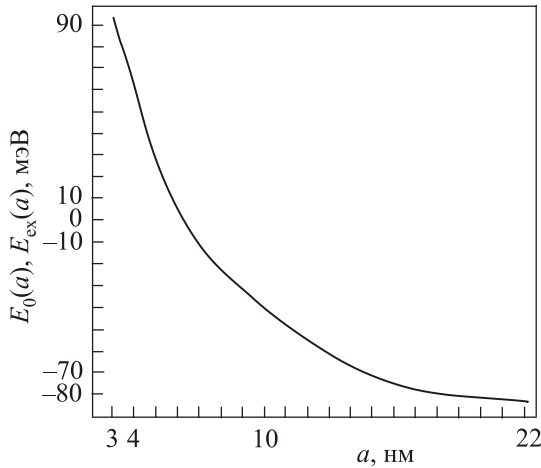


Рис. 1. Зависимость энергии  $E_0$  (и энергии связи  $E_{ex}$ ) основного состояния экситона (с пространственно разделенными электроном и дыркой) от радиуса  $a$  КТ германия в наносистеме, содержащей КТ германия, выращенные в матрице кремния. Нулевое положение энергии совпадает с положением дна зоны проводимости матрицы кремния  $E_{c(Si)}$ .

ла КТ германия, выращенные в матрице кремния, со средними радиусами КТ в интервале  $3 \text{ нм} \leq a \leq 24 \text{ нм}$ .

На рис. 1 видно, что при изменении средних радиусов КТ в интервале  $3 \text{ нм} \leq a \leq 6,4 \text{ нм}$  возникают состояния электронно-дырочной пары с кулоновским взаимодействием электрона и дырки  $V_{eh}(r)$  (2). Энергия основного состояния такой электронно-дырочной пары изменяется в интервале  $0 \leq E_0(a) \leq E_{eh}$  (где  $E_{eh} = 94 \text{ мэВ}$ ). В зоне проводимости матрицы кремния при этом возникает зона состояний электронно-дырочной пары (с пространственно разделенными электроном и дыркой) с шириной, не превышающей  $E_{eh} = 94 \text{ мэВ}$ , расположенная над дном зоны проводимости. Поскольку гамильтониан (1) записан в предположении, что зоны проводимости и валентные зоны в гетероструктуре Ge/Si имеют параболическую форму, энергия основного состояния электронно-дырочной пары должна быть значительно меньше глубины  $\Delta E_{c(Si)}$  потенциальной ямы для неравновесного электрона в матрице кремния (т.е.  $E_{eh}(a) \ll \Delta E_{c(Si)}$ ).

С увеличением среднего радиуса КТ, начиная со значения критического радиуса КТ  $a \geq a_c^{(1)} \cong 6,54 \text{ нм}$ , вблизи сферической поверхности КТ возникают связанные состояния электронно-дырочной пары. При  $a \geq a_c^{(1)}$  состояния электронно-дырочной пары находятся в области отрицательных энергий (отсчитанных от дна зоны проводимости матрицы кремния), что соответствует связанному состоянию электрона и дырки. В этом случае энергия кулоновского взаимодействия  $V_{eh}(r)$  между электроном и дыркой преобладает над энергией размерного квантования электрона и дырки в наносистеме. Энергетические уровни электронно-дырочной пары

при  $a \geq a_c^{(1)}$  находятся в запрещенной зоне матрицы кремния.

С ростом радиуса КТ наблюдается увеличение полной энергии  $|E_0(a)|$  (а также энергии связи  $E_{ex}(a)$ ) основного состояния экситона (с пространственно разделенными электроном и дыркой) в наносистеме. В интервале средних радиусов КТ  $6,54 \text{ нм} \leq a \leq 22,2 \text{ нм}$  энергия связи  $E_{ex}(a)$  основного состояния экситона существенно превышает (в 6 раз) значение энергии связи экситона  $E_{ex}^{3D} = 13,7 \text{ мэВ}$  (8) в монокристалле кремния. Начиная с радиуса КТ  $a \geq a_c^{(2)} \cong 22,2 \text{ нм}$ , значения полной энергии (а также энергии связи) основного состояния экситона в наносистеме асимптотически следуют к значению  $E_{ex}^{2D} = -82 \text{ мэВ}$  (6), характеризующему энергию связи основного состояния двумерного экситона (с пространственно разделенными электроном и дыркой) (см. рис. 1). Значения радиусов КТ  $a_c^{(1)}$  и  $a_c^{(2)}$  могут быть несколько завышенными, поскольку вариационный расчет энергии основного состояния экситона может давать несколько завышенные значения энергии [9]. Следует отметить, что значения энергии  $E_0(a)$  (и энергии связи  $E_{ex}(a)$ ) основного состояния экситона, полученные вариационным методом, значительно меньше ширины запрещенной зоны матрицы кремния  $E_{g(Si)} = 1,17 \text{ эВ}$  (т.е.  $E_0(a) \ll E_{g(Si)}$ , при этом  $E_{ex}^{2D}/E_{g(Si)} = 0,07$ ).

Эффект существенного увеличения энергии связи основного состояния экситона  $E_{ex}(a)$  в наносистеме обусловлен, в основном, пространственным ограничением области квантования объемом КТ. При этом с увеличением радиуса КТ, начиная с  $a \geq a_c^{(2)} \cong 22,2 \text{ нм}$ , экситон в наносистеме становится двумерным с энергией связи основного состояния  $E_{ex}^{2D}$  (6), значение которой существенно превышает (в 6 раз) энергию связи экситона  $E_{ex}^{3D}$  (8) в монокристалле кремния.

Таким образом, в наносистеме, содержащей КТ германия, выращенные в матрице кремния, при изменении средних радиусов КТ в интервале  $3 \text{ нм} \leq a \leq 6,4 \text{ нм}$  в зоне проводимости матрицы кремния сначала возникает зона состояний электронно-дырочной пары (шириной, не превышающей  $E_{eh} = 94 \text{ мэВ}$ ) с кулоновским взаимодействием электрона и дырки  $V_{eh}(r)$  (4), расположенная над дном зоны проводимости. С ростом радиуса КТ (при этом средние радиусы КТ изменяются в интервале  $6,54 \text{ нм} \leq a \leq 22,2 \text{ нм}$ ) зона состояний электронно-дырочной пары переходит в зону экситонных состояний с шириной, не превышающей  $E_{ex}^{2D} = 82 \text{ мэВ}$  (6), расположенной в запрещенной зоне матрицы кремния (под дном зоны проводимости) (см. рис. 1).

В [4] методом электронно-лучевой литографии получены гетероструктуры, представляющие собой линейные цепочки КТ Ge на подложках Si. Средние размеры КТ германия не превышали 60 нм, а среднее расстояние между поверхностями КТ порядка  $d = 180 \text{ нм}$ . При расстояниях между поверхностями КТ порядка  $d$  взаимо-

действием между КТ в наноструктурах можно пренебречь. Оптические свойства таких наносистем в основном определялись энергетическими спектрами электрона и дырки, локализованными вблизи поверхности одиночных КТ Ge, выращенных в матрице Si [1–4].

Для оценок энергий переходов электрона в гетероструктуре Ge/Si с КТ германия будем считать, что КТ имеют сферическую форму. Поскольку в условиях экспериментов [4] средние радиусы КТ не превышали 30 нм, как следует из результатов вариационного расчета энергии основного состояния экситона  $E_0(a)$  в наносистеме, при изменении радиусов КТ германия в интервале  $3 \text{ нм} \leq a \leq 6,4 \text{ нм}$  в зоне проводимости матрицы кремния сначала возникает зона состояний электронно-дырочной пары с кулоновским взаимодействием электрона и дырки  $V_{eh}(r)$  (2) шириной, не превышающей  $E_{eh} = 94 \text{ мэВ}$  (см. рис. 1).

Для межзонного перехода неравновесного электрона с квантоворазмерного уровня  $E_h(a)$ , расположенного в валентной зоне КТ германия, на квантоворазмерный уровень  $E_{eh}(a)$  в зоне проводимости матрицы кремния необходим квант света с энергией

$$\hbar\omega_{eh}(a) = E_{g(\text{Ge})} - \Delta E_{c(\text{Si})} + E_{eh}(a), \quad (10)$$

где  $E_{g(\text{Ge})} - \Delta E_{c(\text{Si})} = 330 \text{ мэВ}$ . Поскольку максимальное значение  $E_{eh} = 94 \text{ мэВ}$ , для такого межзонного перехода электрона, согласно (10), необходим квант света с энергией в интервале  $330 \text{ мэВ} \leq \hbar\omega_{eh}(a) \leq 424 \text{ мэВ}$ .

С ростом радиуса КТ германия (при этом средние радиусы КТ изменяются в интервале  $6,54 \text{ нм} \leq a \leq 22,2 \text{ нм}$ ) зона состояний электронно-дырочной пары переходит в зону экситонных состояний с шириной, не превышающей  $E_{ex}^{2D} = 82 \text{ мэВ}$ , расположенной в запрещенной зоне матрицы кремния (см. рис. 1). Для перехода неравновесного электрона с квантоворазмерного уровня  $E_h(a)$  на уровень  $E_{ex}(a)$  основного состояния экситона необходим квант света с энергией

$$\hbar\omega_{ex}(a) = E_{g(\text{Ge})} - \Delta E_{c(\text{Si})} - E_{ex}(a), \quad (11)$$

где  $E_{ex}(a)$  — энергия связи экситона. Поскольку максимальное значение  $E_{ex} = 82 \text{ мэВ}$ , для перехода неравновесного электрона, согласно (11), необходим квант света с энергией  $248 \text{ мэВ} \leq \hbar\omega_{ex}(a) \leq 330 \text{ мэВ}$ .

Таким образом, внутризонные переходы неравновесного электрона в зоне состояний электронно-дырочной пары и в примыкающей к ней зоне экситонных состояний, при изменении средних радиусов КТ в интервале  $3 \text{ нм} \leq a \leq 24 \text{ нм}$ , а также межзонные переходы электрона между квантоворазмерным уровнем дырки  $E_h(a)$ , расположенным в валентной зоне КТ германия, и квантоворазмерными уровнями электронно-дырочной пары, находящимися в зоне проводимости матрицы кремния, и межзонные переходы электрона между квантоворазмерным уровнем  $E_h(a)$  и квантоворазмерными экситон-

ными уровнями, расположенными в запрещенной зоне матрицы кремния, вызывают значительное поглощение излучения в инфракрасной области длин волн. В рассмотренных интервалах энергий, которые содержатся в спектральной области  $0,25\text{--}1,14 \text{ эВ}$ , где наблюдалось поглощение в условиях экспериментов [1–4] вплоть до комнатной температуры, указанные переходы обуславливают экспериментально установленное существенное размытие края поглощения [1–4].

Локализация неравновесных электронов в окрестностях сферической поверхности раздела КТ–матрица (при этом электроны находятся в зоне экситонных состояний) приводит к уменьшению концентрации электронов и, как следствие, к падению проводимости гетероструктуры Ge/Si с КТ германия (т.е. к эффекту отрицательной фотопроводимости [1–3]).

### Заключение

Проведенные качественные оценки полной энергии  $E_0(a)$  и энергии связи  $E_{ex}(a)$  основного состояния экситона, ширины зоны состояний электронно-дырочной пары  $E_{eh} = 94 \text{ мэВ}$  и ширины зоны экситонных состояний  $E_{ex}^{2D} = 82 \text{ мэВ}$  (6), а также энергий переходов электрона (10), (11) получены в наносистеме без учета электрон-фононного взаимодействия. Учет электрон-фононного взаимодействия приводит к уширению квантоворазмерных энергетических уровней квазичастиц в наносистеме.

Показано, что механизмы поглощения света в гетероструктуре Ge/Si с КТ германия обусловлены внутризонными переходами электрона между квантоворазмерными уровнями электронно-дырочной пары, расположенными в зоне проводимости матрицы кремния, и внутризонными переходами электрона между квантоворазмерными экситонными уровнями, находящимися в запрещенной зоне матрицы кремния, а также межзонными переходами электрона между квантоворазмерным уровнем  $E_h(a)$  дырки, расположенным в валентной зоне КТ германия, и квантоворазмерными уровнями электронно-дырочной пары, и межзонными переходами электрона между квантоворазмерным уровнем  $E_h(a)$  и квантоворазмерными экситонными уровнями, находящимися в запрещенной зоне матрицы кремния.

Изменяя параметры гетероструктур Ge/Si с КТ германия (радиусы КТ, а также отношение эффективных масс квазичастиц  $m_h/m_e^{(1)}$ ), можно направленно варьировать положения энергетических уровней электронно-дырочной пары и экситона (с пространственно разделенными электроном и дыркой), энергии связи экситона, ширины экситонных зон, а также энергии переходов в экситонных зонах. Последнее обстоятельство, а также эффект существенного увеличения энергии связи экситона, по-видимому, открывает новые возможности в использовании таких наногетероструктур в качестве активной области нанолазеров, рабо-

тающих на экситонных переходах при комнатных температурах.

1. А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, А.И. Никифоров, *Письма в ЖЭТФ* **73**, 598 (2001).
2. А.В. Двуреченский, А.И. Якимов, *ФТП* **35**, 1143 (2001).
3. А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, А.И. Никифоров, *Письма в ЖЭТФ* **72**, 267 (2000).
4. Ж.В. Смагина, А.В. Двуреченский, В.А. Селезнев, *ФТП* **49**, 767 (2015).
5. Р.А. Сурис, *ФТП* **49**, 827 (2015).
6. С.И. Покутний, *ФТП* **47**, 780 (2013) [*Semiconductors* **47**, 791 (2013)].
7. С.И. Покутний, Ю.Н. Кульчин, В.П. Дзюба, *ФТП* **49**, 1355 (2015) [*Semiconductors* **49**, 1311 (2013)].
8. Н.А. Ефремов, С.И. Покутний, *ФТТ* **27**, 48 (1985).
9. Y. Kaupama, *Phys. Rev. B* **38**, 9797 (1988).
10. S.I. Pokutnyi, *Phys. Lett. A* **168**, 433 (1992).
11. Ю.Е. Лозовик, В.Н. Нишанов, *ФТТ* **18**, 3267 (1976).

Excitons formed from spatially separated electrons and holes in Ge/Si heterostructures with Ge quantum dots

S.I. Pokutnyi

The effect of a significant increase in the exciton binding energy of space-separated electrons and holes (hole moves in the volume of the quantum dot, and the

electron is localized on a spherical surface section quantum dot–matrix) in nanosystems containing germanium quantum dots grown in a matrix of silicon by compared with the binding energy of an exciton in a silicon single crystal. It was found that in such nanosystems in the conduction band silicon matrix is first a zone of states of electron–hole pairs, which with increasing radius of the quantum dot becomes a zone of exciton states, located in the band gap of silicon matrix. It is shown that the mechanism of light absorption in nanosystems due to transitions between quantum-electron levels of the electron–hole pairs, as well as the electron transitions between quantum-exciton levels.

PACS: **73.21.–b** Electron states and collective excitations in multilayers, quantum wells, mesoscopic, and nanoscale systems.

Keywords: excitons formed from spatially separated electrons and holes, binding energy, quantum dots.