

УДК 621.315.592

Бойчук В. Л., Гольський В. Б.

ЕКСИТОН ВАНЬЄ - МОТТА У ДВОХ ТУНЕЛЬНО-ЗВ'ЯЗАНИХ КВАНТОВИХ ТОЧКАХ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

Працю присвячено дослідженню двох тунельно-зв'язаних «квантових точок» циліндричної форми. Знайдено енергетичний спектр заряду для цієї гетероструктури та явний вигляд хвильової функції квазічастинки. Варіаційним методом розв'язано задачу про знаходження енергії утворення екситону для неї. Отримано якісне пояснення експериментальних результатів роботи [1].

1. Вступ

Актуальність дослідження структур з попарно зв'язаними квантовими наноструктурами зумовлена можливістю створення на їх основі квантового перемикача для квантового процесора [1] у зв'язку з передбаченою раніше надплинністю в таких системах [2], квазідйозефсонівськими явищами [2, 3], незвичайними явищами в магнітних полях [4].

Зокрема, авторами праці [4], в якій досліджувались спектри екситонної люмінесценції в подвійних квантових ямах GaAs в електричному та магнітному полі, спостережено індукований магнітним полем зсув непрямого екситону в область низьких енергій і виникнення періодичних у часі флуктуацій інтенсивності ліній непрямого екситону. За певних значень зовнішнього елект-

ричного поля і температури виявлено суттєве (у 3 рази) збільшення інтенсивності люмінесценції частини спектрального контуру лінії непрямої екситонів в подвійних квантових ямах GaAs/AlGaAs [5].

У праці [1] йдеться про дослідження пари вертикально зв'язаних InAs/GaAs квантових точок (аналог двохатомної молекули). За спектрами фотолюмінесценції досліджено тонку структуру основного стану екситону в InAs/GaAs квантових точках, що тунельно-зв'язані в пари в магнітних полях напруженістю до 8 Тл. У таких структурах виникає можливість керування тунелюванням носіїв струму. У праці [6] показано, що залежно від напруженості магнітного поля енергетичні рівні зсуваються в одній з квантових точок відносно іншої квантової точки, що дає можливість електро-

нам резонансно тунелювати між квантовими точками.

Нині немає теорії, яка пояснювала б отримані результати. Тому нашу працю присвячено дослідженню енергетичного спектра заряду в системі двох тунельно-зв'язаних квантових точок циліндричної форми та дослідженню енергії екситону для вищезгаданої гетероструктури.

2. Заряджена частинка в системі двох тунельно-зв'язаних квантових точок

Розглянемо систему двох близько розмішених квантових точок у вигляді циліндрів, відстань між межами поділу яких дорівнює d (рис. 1). Задача розв'язується в циліндричній системі координат. Систему координат вибираємо так, щоб її центр був розміщений у центрі однієї з основ квантової точки. Радіуси циліндрів однакові й дорівнюють R , a в напрямку Oz у загальному випадку різні - b_1 та b_2 . Гамільтоніан зарядженої квазічастинки (електрона або дірки) в наближенні ефективної маси має вигляд [7-9]

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2} \nabla^2 + U(\rho, \varphi, z), \quad (1)$$

де

$$U(\rho, \varphi, z) = \begin{cases} U_0, & \text{коли частинка знаходиться в ямі,} \\ 0, & \text{коли частинка знаходиться за межами ям,} \end{cases} \quad (2)$$

m - ефективна маса частинки для відповідної області.

Для вибраної моделі гетеросистеми хвильову функцію наведемо у вигляді добутку

$$\Psi(\rho, \varphi, z) = \Psi_1(\rho, \varphi) \Psi_2(z). \quad (3)$$

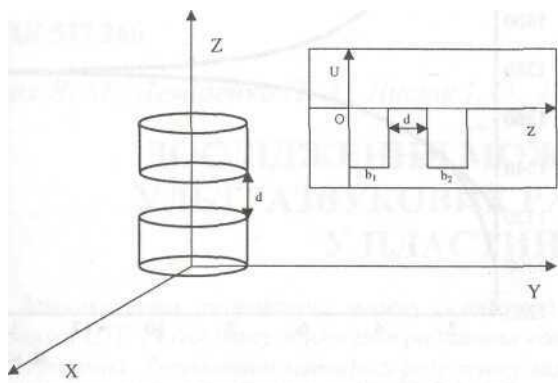


Рис. 1. Модель гетероструктури

Тоді енергія електрона буде дорівнювати сумі енергій:

$$E = E_1 + E_2. \quad (4)$$

Унаслідок симетричного розташування квантових точок задача в площині ρ, φ зводиться до задачі про частинку в одній двовимірній потенціальної ямі:

$$U(\rho) = \begin{cases} U_0, & \rho < R, \\ 0, & \rho \geq R. \end{cases} \quad (5)$$

У напрямку Oz одержимо одновимірну задачу про електрон в системі двох зв'язаних квантових ям.

Хвильова функція, яка є розв'язком задачі в одній двовимірній потенціальної ямі (5), буде мати вигляд

$$\Psi_1(\rho, \varphi) = \begin{cases} A J_0(k\rho), & \text{для } \rho \leq R, \\ B K_0(\chi\rho), & \text{для } \rho > R, \end{cases} \quad (6)$$

де $k = \sqrt{\frac{2m_1}{\hbar^2}(U_0 - E)}$; $\chi = \sqrt{\frac{2m_2}{\hbar^2}E}$; m_1, m_2 - ефективні маси квазічастинки нанокристалу і матриці відповідно.

З умов зшивання ми можемо знайти енергію заряду EI .

Наступний етап полягає в знаходженні розв'язку рівняння Шредінгера для функції $\Psi = \Psi_2(z)$.

Хвильова функція $\Psi = \Psi_2(z)$ має вигляд

$$\Psi(z) = \begin{cases} Ae^{\chi z}, & z < 0, \\ B_1 \sin(kz) + B_2 \cos(kz), & 0 < z < b_1, \\ C_1 e^{-\chi z} + C_2 e^{\chi z}, & b_1 < z < b_1 + d, \\ D_1 \sin(kz) + D_2 \cos(kz), & b_1 + d < z < b_1 + d + b_2, \\ Fe^{-\chi z}, & z > b_1 + d + b_2. \end{cases} \quad (7)$$

Використовуючи умови зшивання, отримаємо систему з восьми однорідних рівнянь. З умови про існування розв'язку системи однорідних рівнянь одержимо дисперсійне рівняння.

Енергію розглядуваної гетероструктури визначено з рівняння, одержаного для E . Залежно від величин b_1 та b_2 у квантовій ямі може бути один, два або більше енергетичних рівнів. Нижче наведено результати взаємодії двох квантових точок, що мають один енергетичний рівень (основний стан) та два енергетичних рівні (основний та збуджений стани) для електрона і дірки.

Конкретні обчислення були проведені для системи InAs/GaAs, в якій нанокристал InAs, що моделюється циліндричною скінченною квантовою ямою, знаходиться в матриці GaAs. На рис. 2 представлено залежність енергії квазі-

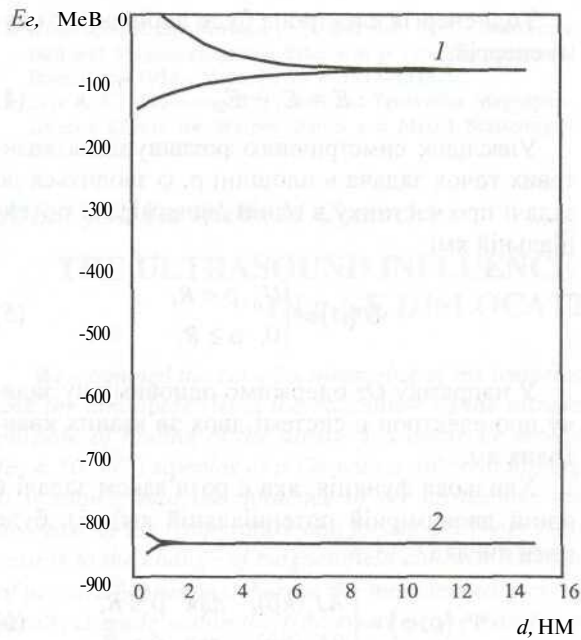


Рис. 2. Залежність величини розщеплення енергетичних рівнів електрона $EI(\bar{I})$ та дірки (2) від відстані між квантовими точками. Товщина квантових точок дорівнює 2 нм

частинки (a - електрона, \bar{b} - дірки) двох однакових квантових точок завтовшки 2 нм від відстані між ними. Як бачимо, енергетичний рівень дірки розщеплюється слабо і на маленьких відстанях між квантовими точками. Величина розщеплення ΔE на відстані 1,16 нм (дві сталі ґратки) дорівнює 6,8 MeV, а на відстані понад 23 нм взаємодія не спостерігається.

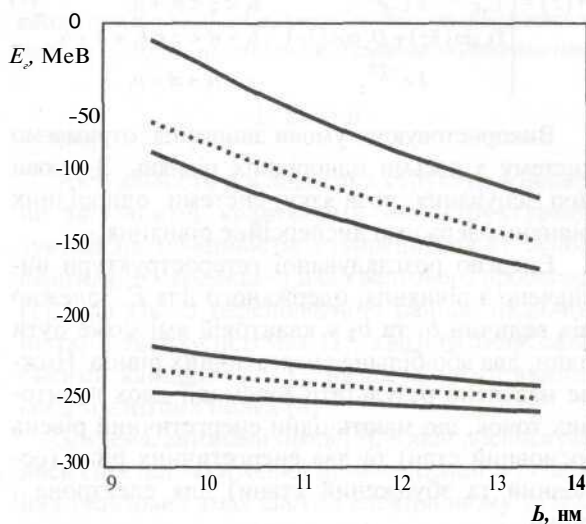


Рис. 3. Залежність розщеплення енергетичних рівнів (основного та першого збудженого) електрона E_e у двох зв'язаних квантових точках однакової величини на відстані $ci = 0,58$ нм від величини нанокристала

На відміну від дірки енергетичні рівні електрона розщеплюються сильніше - ΔE на відстані 1,16 нм дорівнює 140,3 MeV, а взаємодія спостерігається до відстані 1,20 нм. Рис. 3 демонструє залежність енергії електрона від товщини квантової точки за однакової відстані $d = 0,58$ нм. Квантові точки вибирались такої товщини, щоб в них існувало два енергетичних стани, що після розщеплення зумовило виникнення чотирьох станів. З цього рисунка бачимо, що квантові точки, які менші за розміром, сильніше впливають одна на одну, ніж більші квантові точки, та що основний стан ΔE_g розщеплюється менше ніж збуджений ΔE_e . Так, для $b = 10$ нм - $\Delta E_g = 28,1$ MeV, $\Delta E_e = 73,2$ MeV, відповідно, для $b = 13$ нм - $\Delta E_g = 18,4$ MeV, $\Delta E_e = 50,9$ MeV.

3. Екситон Ваньє - Мотта

Для описаної вище гетероструктури розглянемо екситон Ваньє - Мотта. Гамільтоніан цієї системи матиме вигляд

$$\hat{H}_{ex} = \hat{H}_e + \hat{H}_h - \frac{e^2}{\epsilon |\vec{r}_e - \vec{r}_h|}, \quad (8)$$

Де \hat{H}_e та \hat{H}_h мають вигляд (1), ϵ - ефективна діелектрична проникність системи: $\epsilon = \sqrt{\epsilon_{InAs} \epsilon_{GaAs}}$.

Для розв'язку рівняння Шредінгера з гамільтоніаном (8) використано варіаційний метод. Пробну хвильову функцію екситону вибрано у вигляді

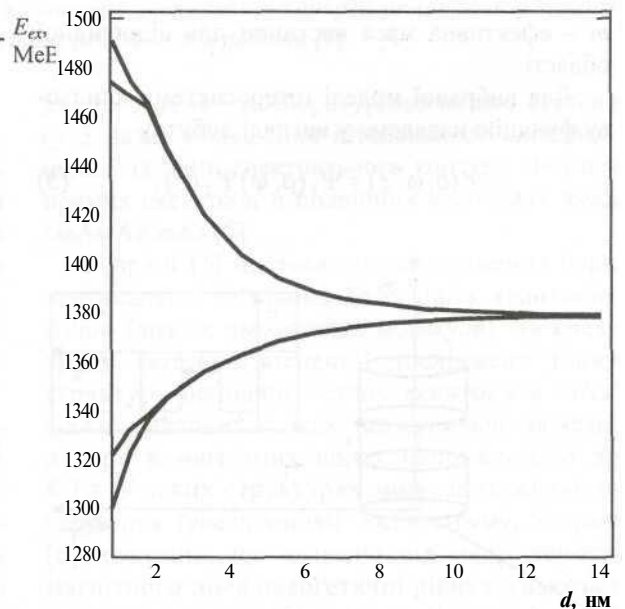


Рис. 4. Залежність енергії утворення екситону від відстані між квантовими точками радіусом $R = 3$ нм, завтовшки $b_1 = b_2 = 2$ нм

$$\Psi_{ex}(\vec{r}_e, \vec{r}_h) = \Psi_e(\rho_e, \varphi_e, z_e) \Psi_h(\rho_h, \varphi_h, z_h) e^{-\alpha|\vec{r}_e - \vec{r}_h|}, \quad (9)$$

де $\Psi_e(\rho_e, \varphi_e, z_e)$ та $\Psi_h(\rho_h, \varphi_h, z_h)$ - відповідно хвильові функції електрона і дірки в розглядуваній гетеросистемі.

На рис. 4 представлено графік залежності енергії утворення екситону від відстані між квантовими точками. Досліджувались квантові точки радіусом $R = 3$ нм і завтовшки $b_2 = B_2 = 2$ нм. На маленьких відстанях (порядку трьох сталих ґратки) існують чотири екситонні рівні внаслідок розщеплення електронного і діркового станів. Коли відстань лежить у межах від 4 до 20 сталих ґратки, система характеризується двома екситонними рівнями, які виникають унаслідок розщеплення основного стану електрона.

У праці [1] розглянуто пари вертикально зв'язаних InAs/GaAs квантових точок. Шари з самоорганізованими індієвими квантовими точ-

ками були розділені GaAs бар'єрами різної ширини - 7 і 8 нм між змочуваними шарами. Кожна точка мала циліндричну форму з радіусом приблизно 15-20 нм і заввишки 2 нм. Для виконання спектроскопічних досліджень у магнітному полі кожна пара зв'язаних квантових точок була ізольована в літографічне приготівленій мезі розміром 100 нм. За спектрами фотолюмінесценції досліджено тонку структуру основного стану екситону. Для зразків без наявності магнітного поля при відстані 7 нм між квантовими точками виявлено розщеплення основного стану екситону на два стани, що якісно узгоджується з результатами обчислень (див. рис. 4). Для кількісного порівняння результатів теорії та експерименту слід розглянути квантові точки більших ніж 3 нм радіусів. У квантових точках радіусами 15—20 нм слід врахувати не менше 8-10 енергетичних станів, що значно ускладнює обчислення.

1. Ларионов А. В., Тимофеев В. Б., Bayer M., Forchel A. // Нанопотоніка.-Новгород, 2001.-С. 109-114.
2. Demel T., Heitmann D., Grambow P., Ploog K. // Phys. Rev. Lett.- 1990.-64, № 7.- P. 788.
3. Dempley J., Jonson N. F., Brey L., Holperin B. I. // Phys. Rev. B.-1990.-18.-P. 11708.
4. Криволапчук В. В., Мазуренко Д. А., Москаленко Е. С. и др. // Физика тверд. тела- 1998.-40, № 5-С. 803-805.
5. Москаленко Е. С., Криволапчук В. В., Жмодиков А. Л. //

Тамсамо.-2000.-42, вып. 8.-С. 1492-1498.

6. Оно К., Austing D. G., Tokura Y., Tarucha S. // Phys. B: Condensed Matter.- 2002,- 314, № 1/4.- P. 450-54.
7. Бойчук В. Л., Гольський В. Б. // Укр. фіз. журн.- 2001.- 46, №3.-С. 342-345.
8. Boichuk V., Holskyi V., Shevchuk I // НТШ. Фіз. зб.- 2002.- Т. 5.-С. 107-118.
9. Бойчук В. Л., Білинський І. В., Гольський В. Б // Укр. фіз. журн.- 2003.-48, № 1.-С. 56-60.

V. Boichuk, V. Holskyi

WANNIER-MOTT EXCITON BEHAVIOUR IN A SYSTEM OF TWO TUNNEL-CONNECTED CYLINDRICAL QUANTUM DOTS

This paper studies two tunneling-bound QD of cylindrical shape. The energy distribution of the charge for given heterostructure and an obvious view of the wavefunction of the quasi-particle is found. The problem of definition of energy of exciton formation for the given heterostructure was solved by variation method. A qualitative explanation of the experimental results of operation [1] is received.