

Температурні зміни енергетичних характеристик поверхневого шару квантових точок InAs в матриці GaAs

С.К. Губа¹, В.М. Юзевич^{1,2,3}

¹ Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, вул. Наукова 5, 79060 Львів, Україна

³ Куявсько-Поморська школа вища в Бидгощі, вул. Торунська, 55-57, 85-023, Бидгощ, Польща

(Одержано 14.09.2015; у відредагованій формі – 04.11.2015; опубліковано online 24.12.2015)

У роботі розвинута теоретична модель для розрахунку енергетичних характеристик поверхонь квантових точок (КТ) InAs в матриці GaAs при зміні температури їх самоорганізації. Описана теоретична модель дозволяє розраховувати поверхневі енергетичні та адгезійні параметри КТ InAs в матриці GaAs при зміні температури їх самоорганізації.

Розраховані результати дають можливість досліджувати (аналізувати) характеристики міжфазних шарів на межах поділу КТ InAs / ЗШ In, ЗШ In / GaAs, КТ InAs / GaAs підкладка (ЗШ – змочуючий шар металу). Вони можуть бути використані для аналізу, тобто визначення загальних закономірностей зміни енергетичних параметрів КТ InAs в матриці GaAs(100). Крім того вони корисні при моделюванні зміни енергетичних характеристик поверхневих шарів, які характеризують механізми взаємодії і релаксації пружних напружень та поверхневих енергій системи GaAs / In / InAs.

Ключові слова: Квантова точка, Самоорганізація, Енергетичні характеристики поверхневих шарів, Система GaAs / In / InAs.

PACS numbers: 68.65. Hb, 81.10.Aj

1. ВСТУП

Унікальні фізичні властивості напівпровідникових квантових точок (КТ) стимулювали розвиток технології їх виготовлення. В даний час нанотехнології досягли такого рівня, що дозволяють конструювати високоякісні оптоелектронні прилади на базі масивів КТ [1]. Особливості електронної структури КТ обумовлені не тільки їх складом і розмірами, але й впливом внутрішніх пружних деформацій [2, 3].

Одним із шляхів формування упорядкованих рядів КТ є явище самоорганізації наноструктур на поверхні кристалу. Це явище у більшості напівпровідникових гетероепітаксійних систем і в першу чергу системи КТ InAs / GaAs (100) виникає за рахунок великої невідповідності параметрів ґраток ($f_n = 7\%$), яке призводить до релаксації пружних напружень завдяки утворенню напружених острівців КТ [4]. У праці [5] було проведено дослідження пружних властивостей і характеристик дислокацій невідповідності гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / \text{GaAs}$. Інша характеристика, яка впливає на кінетику росту КТ – поверхнева енергія. У зв'язку з цим, для більш глибокого розуміння механізму самоорганізації КТ InAs у матриці GaAs і їх електронної структури, актуальною стає задача провести дослідження температурних змін енергетичних параметрів міжфазної взаємодії: міжфазного натягу $S_m = f(T)$, міжфазної енергії $G_m = f(T)$, роботи адгезії $A_{ad} = f(T)$, енергії адгезійних зв'язків $W_{ad} = f(T)$, відповідно до термодинамічної моделі системи GaAs / In / KTIInAs. Тому метою даної роботи є визначення зміни енергетичних характеристик поверхневого шару системи GaAs / In / КТ InAs, що ґрунтується на положеннях нерівноважної термодинаміки і фізики поверхні згідно роботи [6].

2. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІН ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ І ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ

Для розрахунку поверхневого натягу і поверхневої енергії розглянемо макроскопічну модель поверхневого шару твердого тіла, в якій область $x > 0$ (V_1) займає суцільне середовище (матеріал квантової точки, зокрема, InAs), а $x < 0$ (V_2) – підкладка GaAs (x, y, z – декартові координати).

Співвідношення термодинамічної моделі поверхневого шару на поверхні напівпровідникового матеріалу подамо у вигляді [6, 7]:

$$\text{Div } \hat{\sigma} + \rho \cdot \omega \cdot \vec{E} = 0, \quad (2.1)$$

$$\Delta \phi = \rho \cdot C_\phi \cdot \phi / \varepsilon_0, \quad (2.2)$$

$$\sigma_h = \int_0^h \sigma_y dx, \quad \sigma_y = \sigma_z, \quad (2.3)$$

$$\sigma_y + p = 0 \quad (\text{для } x = h) \quad (p = 100 \text{ кПа} - \text{атмосферний тиск}), \quad (2.4)$$

$$\gamma = \gamma_1 + \xi \gamma_2, \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial k} = \frac{\partial(\gamma_1 + \xi \gamma_2)}{\partial k} = 0, \quad k = \sqrt{\frac{\rho C_\phi}{\varepsilon_0}} \quad (2.6)$$

$$\sigma_{ij} = \left(\left(K - \frac{2}{3} G \right) e - \alpha_i K \cdot \Delta T - K(\beta \phi + \beta_c e) \right) \delta_{ij} + 2G e_{ij} \quad (2.7)$$

$$\omega_V = \rho \omega = \rho C_\phi (\phi - \gamma_i \cdot \Delta T) + \beta K e - \rho \eta_c \quad (2.8)$$

$$\mu_c = d_c c + d_i \cdot \Delta T + \beta_c K \frac{e}{\rho} - \eta_c \phi, \quad \Delta T = T - T_0, \quad (2.9)$$

$$\phi = -\Phi_0; \quad \phi + \psi = const; \quad \sigma_x = -\frac{\epsilon_0}{2} \cdot \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right)^2 \quad (2.10)$$

при $x = 0$. Тут σ_n – поверхневий натяг; γ – поверхнева енергія (ПЕ); $\gamma_1 = \int_0^h w_1 dx$ – складова ПЕ, яка відповідає зв'язаним електричним зарядам (так названа електрична складова); $\gamma_2 = \int_0^h w_2 dx$ – механічна скла-

$$\text{дова ПЕ; } w_1 = \frac{\epsilon_0}{2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right)^2; \quad w_2 = \frac{\sigma_x (\sigma_x - 4\nu\sigma_y)}{2E} + \frac{(1-\nu)\sigma_y^2}{E};$$

w_1, w_2 – густини електричної та механічної складових ПЕ; h – ефективна товщина поверхневого шару;

σ_{ij}, e_{ij} – компоненти тензорів напружень $\hat{\sigma}$ і деформацій \hat{e} ($i, j = 1, 2, 3$); $\sigma_{11} = \sigma_x; \sigma_{22} = \sigma_y; \mu, c$ – хімічний потенціал і концентрація домішки; $\xi, k, \alpha, \beta, \beta_c, C_\phi, \gamma, \eta_c, d_c, d_l$ – фізичні характеристики матеріалу; δ_{ij} – символи Кронекера; e – перший інваріант тензора деформацій; ρ – питома густина матеріалу; ω_v, ω – просторова і масова густини зв'язаних електричних зарядів відповідно; $\phi = \Phi - \Phi_0$ – відхилення модифікованого потенціалу Φ зв'язаних електричних зарядів від його рівноважного значення Φ_0 в об'ємі тіла далеко від поверхні; Ψ – скалярний потенціал напруженості електричного поля; $\psi = \Psi - \Psi_0$ – відхилення потенціалу Ψ від його рівноважного значення Ψ_0 ; $\vec{E}_{el} = \nabla \Psi = grad \Psi$ – напруженість електричного поля; ϵ_0 – електрична постійна; $\Delta T = T - T_0$ – зміна температури; $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$; K, G – модулі внутрішнього стиску і зсуву відповідно; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона.

Співвідношення (2.1)–(2.6) складають систему рівнянь для визначення фізичних $\xi, k, \alpha, \beta, \beta_c, C_\phi, \gamma, \eta_c, d_c, d_l$ і геометричної h характеристик поверхневого шару.

Використовуючи рівняння рівноваги (2.1), співвідношення, яке випливає з рівнянь Максвелла (2.2), рівняння стану (2.7)–(2.9) і граничні умови (2.10), напруження (і компоненти тензора поверхневого натягу) у поверхневому шарі знаходимо, розкладаючи їх і деформації в ряди за малим параметром $b_m = \beta\Phi_0$.

Вирази (2.3) і (2.5) пояснюють фізичну суть поверхневих натягу σ_n та енергії γ , а (2.6) – умову квазірівноваги поверхневого шару (стосовно перерозподілів механічних напружень і зв'язаних електричних зарядів).

3. ВИЗНАЧЕННЯ МІЖФАЗНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЕНЕРГІЇ АДГЕЗІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ

Фізичні параметри перехідного шару на межі розділу КТ (квантова точка – підкладка) визначаємо із контактної задачі на основі рівнянь, аналогічних до рівнянь праці [8], які є узагальненням співвідношень (1)–(7).

Міжфазні енергію W_m та натяг σ_m подамо у вигляді [6]:

$$W_m = \gamma_3 + \xi_m \gamma_4; \quad \gamma_3 = \int_{-H}^H w_1 dx; \quad \gamma_4 = \int_{-H}^H w_2 dx;$$

$$\sigma_m = \int_{-H}^H \sigma_y dx, \quad (3.1)$$

Тут $\xi_m, z_m = \gamma_3/W_m$ – фізичні характеристики міжфазного шару; $2H$ – ефективна товщина міжфазного шару.

Умову рівноваги міжфазного шару та наближені умови на границях (при $x = H$ та $x = -H$) запишемо так [8]:

$$\begin{aligned} \partial W_m / \partial x &= \partial(\gamma_3 + \xi_m \gamma_4) / \partial x = 0; \\ \sigma_y^+ + p &= 0 \quad (x = +H); \quad \sigma_y^- + p = 0 \quad (x = -H) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Тут індекс (+) відповідає параметрам КТ, а (–) – параметрам другого середовища (зокрема, підкладки).

Подамо граничні умови для межі поділу середовищ КТ – підкладка:

$$\phi_+ = \phi_-; \quad \sigma_{x+} = \sigma_{x-}, \quad \sigma_{y+} = \sigma_{y-} \quad \text{при } (x = 0). \quad (3.3)$$

Співвідношення (3.1)–(3.3) створюють основу системи рівнянь для визначення фізичних характеристик $\xi_m, b = (b_+, b_-), k = (k_+, k_-)$ і товщини $2H$ міжфазного шару.

Як видно з умов на границі (3.3) задача визначення розподілу вільних та зв'язаних електричних зарядів і механічних напружень – контактна. Таким чином, співвідношення (3.1)–(3.3) є основою контактної задачі.

Роботу адгезії A_{ad} і енергію адгезійних зв'язків W_{ad} системи КТ – підкладка визначимо на основі відомих співвідношень [6]:

$$A_{ad} = \sigma_{n+} + \sigma_{n-} - \sigma_m, \quad (3.4)$$

$$W_{ad} = \gamma_+ + \gamma_- - W_m. \quad (3.5)$$

4. ЧИСЛОВІ РОЗРАХУНКИ. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Використовуємо експериментальні дані й табличні значення фізичних величин для неорганічних матеріалів [9-12]. Числові значення фізичних констант для матеріалу КТ InAs, підкладки GaAs та змочуючого шару (ЗШ) In подано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Фізичні характеристики GaAs, InAs, In

Матеріал	E , ГПа	ν	$N \cdot 10^{28}$, 1/м ³	σ_n , Н/м	γ , Дж/м ²
GaAs	85,06	0,35	4,42	1,17	1,67
InAs	51,42	0,31	3,96	0,76	1,08
In	11	0,46	3,68	0,56	0,56

Тут $N_{GaAs}, N_{InAs}, N_{In}$ – числа атомів матеріалу в одиниці об'єму.

Температурний інтервал розрахунку визначення зміни енергетичних характеристик поверхневого шару системи GaAs – In – КТ InAs вибирався з технологічних умов отримання КТ InAs в матриці GaAs основними методами епітаксії: молекулярно-променевої (МПЕ) [13], МОС-гідридної [14] і хлорид-гідридної (ХГЕ) [15].

Характеристики міжфазних шарів: міжфазного натягу $S_m = f(T)$, міжфазної енергії $G_m = f(T)$, роботи адгезії $A_{ad} = f(T)$, енергії адгезійних зв'язків $W_{ad} = f(T)$ на границях середовищ між КТ InAs і ЗШ In, ЗШ In і підкладкою GaAs знаходимо на основі методики роботи [6]. Тиск всередині КТ InAs приймався у вигляді двох граничних величин: рівний атмосферному тиску $p_x = p_y = 0,1$ МПа і $p_x = p_y = 3,5$ ГПа згідно роботи [16].

На рис. 1 показано розраховані температурні залежності енергетичних параметрів міжфазної взаємодії для системи підкладки GaAs / КТ InAs при атмосферному тиску у квантовій точці InAs. Рис. 1 відповідає ситуації, коли перехідний ЗШ індію відсутній або настільки малий, що ним можна нехтувати.

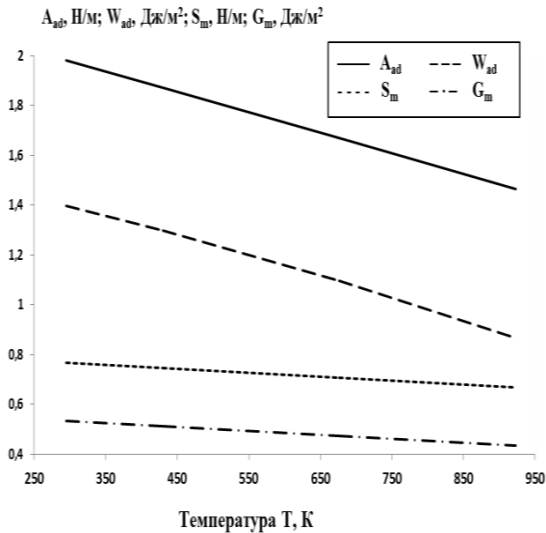


Рис. 1 – Температурні залежності роботи адгезії A_{ad} , енергії адгезійних зв'язків W_{ad} , міжфазного натягу S_m , міжфазної енергії G_m для системи підкладки GaAs / КТ InAs при атмосферному тиску у квантовій точці InAs (тиск $p_x = 0,1$ МПа; $p_y = 0,1$ МПа)

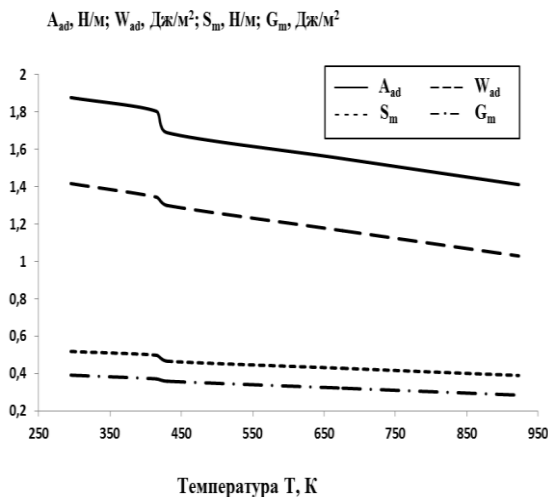


Рис. 2 – Температурні залежності роботи адгезії A_{ad} , енергії адгезійних зв'язків W_{ad} , міжфазного натягу S_m , міжфазної енергії G_m для системи підкладки GaAs / ЗШ In при атмосферному тиску (тиск $p_x = 0,1$ МПа; $p_y = 0,1$ МПа)

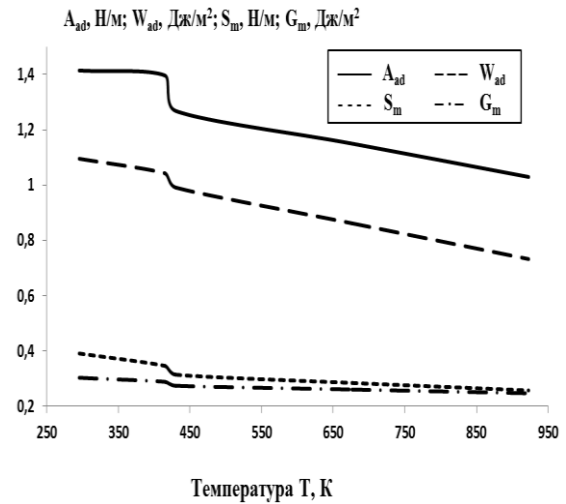


Рис. 3 – Температурні залежності роботи адгезії A_{ad} , енергії адгезійних зв'язків W_{ad} , міжфазного натягу S_m , міжфазної енергії G_m , (штрих-пунктир для системи ЗШ In / КТ InAs при атмосферному тиску у квантовій точці InAs (тиск $p_x = 0,1$ МПа; $p_y = 0,1$ МПа)

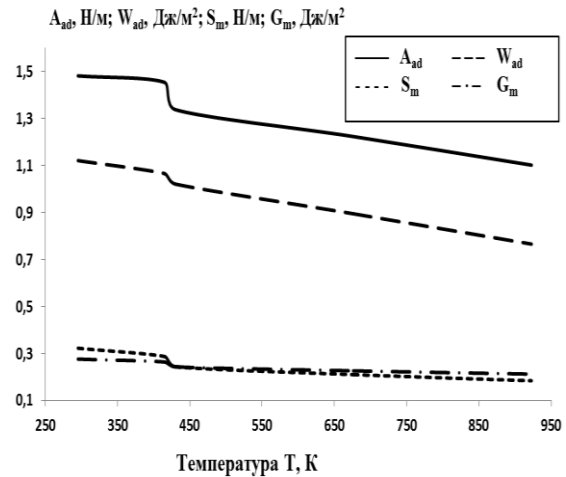


Рис. 4 – Температурні залежності роботи адгезії A_{ad} , енергії адгезійних зв'язків W_{ad} , міжфазного натягу S_m , міжфазної енергії G_m для системи ЗШ In – КТ InAs при тиску у квантовій точці InAs (Тиск $p_x = 3,5$ ГПа; $p_y = 3,5$ ГПа)

На рис. 2-4 представлені розраховані температурні залежності енергетичних параметрів міжфазної взаємодії для системи підкладки GaAs / ЗШ In при різних значеннях тиску в КТ.

Аналіз всіх температурних залежностей міжфазних енергетичних параметрів показав, що з збільшенням температури всі вони у процесах самоорганізації КТ InAs в матриці GaAs майже лінійно зменшують свої числові величини. У точці плавлення In на температурних залежностях (рис. 2-рис. 4) для міжфазних енергетичних параметрів спостерігається «стрибок», що добре узгоджується з експериментом [17]. Аналіз температурних залежностей (рис. 1, рис. 2) міжфазних енергетичних параметрів показав, що з збільшенням товщини ЗШ In всі енергетичні параметри у процесі самоорганізації КТ InAs в матриці GaAs мають зменшувати свої значення. Порівняльна характеристика температурних залежностей

(рис. 3, рис. 4) показала, що з збільшенням тиску у КТ InAs міжфазні енергетичні параметри зростають. При атмосферному тиску у квантовій точці InAs (рис. 3) міжфазний натяг S_m чисельно стає рівним міжфазній енергії G_m в інтервалі температур $T = 730\div 950$ К, а при тиску у квантовій точці InAs (рис. 4) (Тиск $p_x = 3,5$ ГПа; $p_y = 3,5$ ГПа) міжфазний натяг S_m чисельно стає рівним міжфазній енергії G_m в інтервалі температур $T = 430\div 950$ К. Таким чином з ростом тиску у квантовій точці InAs збільшується температурний інтервал однакових числових величин міжфазного натягу S_m з міжфазною енергією G_m .

Самоорганізація КТ InAs в матриці GaAs для різних епітаксійних методів відбувається при температурах: МПЕ – $695\div 755$ К, МОС-гібридна і низькотемпературна ХГЕ – $765\div 825$ К. Із цього випливає, що всі міжфазні енергетичні параметри для самоорганізації КТ InAs в матриці GaAs для МПЕ на межі поділу підкладка GaAs / ЗШ In знаходяться в інтервалах $A_{ad} = 1,561\div 1,521$ Н/м, $W_{ad} = 1,185\div 1,521$ Дж/м², $S_m = 0,418\div 0,411$ Н/м, $G_m = 0,331\div 0,312$ Дж/м² (рис. 2); на межі поділу ЗШ In / КТ InAs при тиску у квантовій точці InAs (тиск $p_x = 3,5$ ГПа; $p_y = 3,5$ ГПа) знаходяться в інтервалах $A_{ad} = 1,232\div 1,204$ Н/м, $W_{ad} = 0,892\div 0,871$ Дж/м², $S_m = 0,232\div 0,221$ Н/м, $G_m = 0,232\div 0,221$ Дж/м² (рис. 4). Для МОС-гібридної і низькотемпературної ХГЕ міжфазні енергетичні параметри для самоорганізації КТ InAs в матриці GaAs для межі поділу підкладка GaAs / ЗШ In знаходяться в інтервалах $A_{ad} = 1,519\div 1,498$ Н/м, $W_{ad} = 1,152\div 1,143$ Дж/м², $S_m = 0,409\div 0,403$ Н/м, $G_m = 0,310\div 0,305$ Дж/м² (рис. 2); на межі поділу ЗШ In / КТ InAs при тиску у квантовій точці InAs (тиск $p_x = 3,5$ ГПа; $p_y = 3,5$ ГПа) знаходяться в інтервалах $A_{ad} = 1,201\div 1,156$ Н/м, $W_{ad} = 0,869\div 0,818$ Дж/м², $S_m = 0,221\div 0,212$ Н/м, $G_m = 0,221\div 0,212$ Дж/м² (рис. 4).

5. ВИСНОВКИ

На основі термодинамічного підходу [6] і основних співвідношень фізики поверхні з використанням

експериментальних результатів розраховані температурні залежності енергетичних параметрів міжфазної взаємодії: міжфазного натягу $S_m = f(T)$, міжфазної енергії $G_m = f(T)$, роботи адгезії $A_{ad} = f(T)$, енергії адгезійних зв'язків $W_{ad} = f(T)$, відповідно до термодинамічної моделі системи GaAs / In / КТ InAs.

На базі розрахованих температурних залежностей енергетичних параметрів досліджено температурні зміни фізичних енергетичних характеристик міжфазних шарів гетеронаноструктури InAs / GaAs при самоорганізації КТ InAs в матриці GaAs.

Знайдені числові інтервали енергетичних параметрів міжфазної взаємодії при самоорганізації КТ InAs в матриці GaAs для різних епітаксійних методів МПЕ, МОС-гібридної і низькотемпературної ХГЕ.

Отриманні результати дають можливість досліджувати і оптимізувати характеристики міжфазних шарів на границях поділу КТ InAs / ЗШ In, ЗШ In / підкладка GaAs, КТ InAs / підкладка GaAs. Результати досліджень можуть бути використані для аналізу – визначення загальних закономірностей зміни параметрів від температури зародкоутворення і росту КТ InAs в матриці GaAs(100). Крім того вони корисні при моделюванні змін енергетичних характеристик міжфазних та поверхневих шарів, котрі характеризують механізми взаємозв'язку між релаксацією пружних напружень і поверхневої енергії системи GaAs / In / InAs. Орієнтація на дослідження поведінки фізичних характеристик системи GaAs / In / InAs визначатиме частину загальної проблеми встановлення інваріантної поведінки фізичних характеристик міжфазних та поверхневих шарів сполук A^{III}B^V в умовах нагрівання (охолодження).

Подальший розвиток досліджень згідно модельних уявлень роботи [6] пов'язаний з урахуванням ролі міжфазних енергетичних та адгезійних характеристик КТ в описі дислокованих кластерів [18], котрі є основними дефектами в гетеронаноструктурах з КТ.

Температурные изменения энергетических характеристик поверхностного слоя квантовой точки InAs в матрице GaAs

С.К. Губа¹, В.М. Юзевич^{1,2,3}

¹ *Національний університет "Львівська політехніка", ул. С. Бандэри, 12, 79013 Львів, Україна*

² *Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенко Національної академії наук України, ул. Научная 5, 79060 Львів, Україна*

³ *Куявско-Поморська вища школа в Быдгощі, ул. Торунська, 55-57, 85-023 Быдгощ, Польща*

В работе развита теоретическая модель для расчета энергетических характеристик поверхностей квантовых точек (КТ) InAs в матрице GaAs при изменении температуры их самоорганизации. Изложенная теоретическая модель позволяет рассчитывать межфазные энергетические и адгезионные параметры КТ InAs в матрице GaAs при изменении температуры их самоорганизации.

Рассчитанные результаты дают возможность исследовать (анализировать) характеристики межфазных слоев на границе раздела КТ InAs / СС In, СС In / GaAs, КТ InAs / GaAs подложка (СС – смачивающий слой металла). Они могут быть использованы для анализа – определения общих закономерностей изменений энергетических параметров КТ InAs в матрице GaAs(100). Кроме того они полезны при моделировании изменений энергетических характеристик поверхностных слоев, которые характеризуют механизмы взаимосвязей между релаксацией упругих напряжений и поверхностной энергией системы GaAs / In / InAs.

Ключевые слова: Квантовая точка, Самоорганизация, Энергетические характеристики поверхностных слоев, Система GaAs / In / InAs.

The Temperature Changes of the Energy Characteristics of the Surface Layer of InAs Quantum Dots in GaAs Matrix

S.K. Guba¹, V.N. Yuzevich^{1,2,3}

¹ Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery St., 79013 Lviv, Ukraine

² Physicomechanical Institute by name G. Karpenko, Nat. Acad. Sci. of Ukraine, 5, Naukova St., 79060 Lviv, Ukraine

³ Kujawsko Pomorska Szkoła Wyższa w Bydgoszczy, 55-57, Torunska St., 85-023 Bydgoszcz, Poland

The work developed a theoretical model for calculating the surface energy characteristics of quantum dots (QD) InAs in the GaAs matrix when the temperature of self-organization. The stated theoretical model allows the calculation of interfacial energy and adhesion parameters InAs QDs in GaAs matrix when the temperature of self-organization. The calculated results provide an opportunity to explore (analyze) the characteristics of interfacial layers at the QD InAs / WL In, WL In / GaAs, QD InAs / GaAs substrate (WL – wetting layer of metal). They can be used for analysis - identifying common patterns of change in the energy parameters of QD InAs in a matrix GaAs (100). In addition, they are useful for modeling changes in the energy characteristics of the surface layers, which characterize the relationship between the mechanisms of relaxation of elastic stresses and the surface energy of GaAs / In / InAs system.

Keywords: Quantities dots, Self-organization, Energy characteristics of surface layers, GaAs / In / InAs system.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. N.N. Ledentsov, V.A. Schukin, T. Kettler, K. Posilovic, D. Bimberg, L.Y. Karachinsky, A.Y. Gladyshev, M.V. Maximov, L.I. Novikov, Y.M. Shernakov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh, *J. Cryst. Growth* **301**, 914 (2007).
2. B.V. Novikov, G.G. Zegrya, R.M. Peleshchak, O.O. Dan'kiv, V.A. Gaisin, V.G. Talalaev, I.V. Shtrom, G.E. Cirlin, *Semiconductors* **42**, 1076 (2008).
3. R.M. Peleshchak, S.K. Guba, O.V. Kuzyk, I.V. Kurilo, O.O. Dan'kiv, *Semiconductors* **47**, 349 (2013).
4. O.P. Pehelyakov, Yu.B. Bolkhovityanov, A.V. Dvurechenskii, L.V. Sokolov, A.I. Nikoforov, A.I. Yakimov, B. Voinglander, *Semiconductors* **34**, 1229 (2000).
5. I.V. Kurilo, S.K. Guba, *Inorganic Mater.* **47**, 819 (2011).
6. S.K. Guba, V.N. Yuzevich, *Semiconductors* **48**, 905 (2014).
7. В.Н. Юзевич, *Термодинамика необратимых процессов* (Москва: Наука: 1992) (V.N. Yuzevich, *Termodinamika neobratimyykh protsessov* (Moskva: Nauka: 1992)).
8. V.M. Yuzevich, *Mater. Sci.* **35**, 237 (1999).
9. *Таблицы физических величин: Справочник* (Москва: Атомиздат: 1976) (*Tablitsy fizicheskikh velichin: Spravochnik* (Moskva: Atomizdat: 1976)).
10. *Поверхностные свойства твердых тел* (Ред. М. Грина.) (Москва: Мир: 1972) (*Poverkhnostnyye svoystva tverdykh tel* (Red. M. Grina.) (Moskva: Mir: 1972)).
11. Ч. Киттель, *Введение в физику твердого тела* (Москва: Наука: 1978) (Ch. Kittel, *Vvedeniye v fiziku tverdogo tela* (Moskva: Nauka: 1978)).
12. N.V. Sibirev, M.A. Timofeeva, A.D. Bol'shakov, M.V. Nazorenko, V.G. Dubrovskii, *Phys. Solid State* **52**, 1531 (2010).
13. V.G. Dubrovskii, Yu.G. Musikhin, G.E. Cirlin, V.A. Egorov, N.K. Polyakov, Yu.B. Samsonenko, A.A. Tonkikh, N.V. Kryzhanovskaya, N.B. Bert, V.N. Ustinov, *Semiconductors* **38**, 329 (2004).
14. B.N. Zvonkov, I.A. Karpovich, N.V. Baidus, D.O. Filatov, S.V. Morozov, *Semiconductors* **35**, 93 (2001).
15. С.К. Губа, *ТКЭА* **2**, 40 (1998) (S.K. Guba, *TKEA* **2**, 40 (1998)).
16. А. Адамсон, *Физическая химия поверхностей* (Москва: Мир: 1979) (A. Adamson, *Fizicheskaya khimiya poverkhnostey* (Moskva: Mir: 1979)).
17. Н.Т. Гладких, С.В. Дукаров, А.П. Крышталь, В.И. Ларин, В.Н. Сухов, С.И. Богатыренко, *Поверхностные явления и фазовые превращения в конденсированных пленках* (Харьков: ХНУ: 2004) (N.T. Gladkikh, S.V. Makarov, A.P. Kryshtal, V.I. Larin, V.N. Sukhov, S.I. Bogatyrenko, *Poverkhnostnyye yavleniya i fazovyye prevrashcheniya v kondensirovannykh plenkakh* (Kharkov: KhNU: 2004)).
18. M.G. Milvidskii, V.V. Chaldyshev, *Semiconductors* **32**, 457 (1998).