

ЕЛЕКТРОННІ ВЛАСТИВОСТІ НАПРУЖЕНИХ ШАРІВ CdTe та ZnTe У ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Р.М. Балабай, С.С. Піскльонов

*Криворізький державний педагогічний університет, кафедра фізики та методики її навчання
Україна*

Надійшла до редакції 25.07.2011

В даній роботі методами функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу із перших принципів були отримані розподіли густини валентних електронів та електронні енергетичні спектри для напружених гетероструктур CdTe/ZnTe та гетероструктур CdTe/ZnTe з квантовими точками CdTe. Використовуючи авторське програмне забезпечення було виявлено, що механічне напруження плівки CdTe суттєво впливає на перебудову розподілу валентних електронів у плівці. Розподіл густини валентних електронів в гетеропереході отримує такий характер, котрий дозволяє сказати, що він узагальнюється для всіх атомів напружених пластів CdTe, а не тільки найближчої координаційної сфери. Показано, що дозволені енергетичні стани гетероструктури CdTe/ZnTe з квантовими точками CdTe перегруповуються з утворенням максимуму біля рівня Фермі.

Ключові слова: гетероструктура CdTe/ZnTe, квантові точки CdTe, розрахунки із перших принципів, електронна густина, електронні енергетичні спектри.

В данной работе методами функционала электронной плотности и псевдопотенциала из первых принципов были получены распределения плотности валентных электронов и электронные энергетические спектры для напряженных гетероструктур CdTe/ZnTe и гетероструктур CdTe/ZnTe с квантовыми точками CdTe. Используя авторское программное обеспечение, было обнаружено, что механическое напряжение пленки CdTe существенно влияет на перестройку распределения валентных электронов в пленке. Распределение плотности валентных электронов в гетеропереходе получает такой характер, который позволяет сказать, что он обобщается для всех атомов напряженных слоев CdTe, а не только ближайшей координационной сферы. Показано, что разрешенные энергетические состояния гетероструктуры CdTe/ZnTe с квантовыми точками CdTe перегруппировываются с образованием максимума около уровня Ферми.

Ключевые слова: гетероструктура CdTe/ZnTe, квантовые точки CdTe, расчеты из первых принципов, электронная плотность, электронные энергетические спектры.

In this work, we used ab-initio calculations in the framework of the electron density functional theory and the pseudopotential have been obtained density distributions of valence electrons and the electron energy specters for strained geterostructures CdTe/ZnTe and geterostructures CdTe/ZnTe with quantum dots CdTe. Using author's program code, it was found that the stress of the film CdTe significantly impacts on the restructuring of the distribution of valence electrons in the film. The density distribution of valence electrons in a geterostructure receives such a character that allows us to say that it can be generalized for all the atoms strained CdTe layers, not just the nearest coordination sphere. It is shown that the allowed energy states of the geterostructure CdTe/ZnTe with quantum dots CdTe rearrange to form a peak near the Fermi level.

Keywords: geterostructure CdTe/ZnTe, quantum dots CdTe, ab-initio calculations, electron density, electron energy specters.

ВСТУП І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В останні роки інтерес до непланарних, тривимірних (3D) та механічно напружених напівпровідникових наноструктур значно зріс через унікальні фізичні властивості, що притаманні цим об'єктам і перспективність мож-

ливих застосувань. Істотним поштовхом у розвитку фізики 3D наноструктур послужила запропонована російськими ученими нова технологія створення нанооб'єктів: нанотруб, нанокілець, наноспіралей й інших більш складних 3D об'єктів шляхом селективного

травлення напружених наноструктур [1 – 3]. Одним з головних достоїнств запропонованої технології є прецизійний контроль розмірів і форми одержуваних наноструктур. Це досягається за рахунок використання молекулярно-пучкової епітаксії, що дозволяє контролювати товщину вирощуваних шарів з точністю до моношару, а також за рахунок застосування літографії та технології селективного травлення.

Клас матеріалів, використовуваних для створення 3D нанооб'єктів на основі описаної технології, швидко розширюється. На цей момент створені 3D наноструктури на основі напівпровідникових сполук: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ [1], $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ [4], металів Au/Ti [5], полімерів [6], а також композитних структур: $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{Au}$ [7], $\text{SiGe}/\text{Si}/\text{Ti}$ [8], InGaAs/Cr [9], $\text{SiGe}/\text{Si}/\text{Si}/\text{Cr}$ [10,11]. В роботі [12] були запропоновані та реалізовані підходи для створення напівпровідникових 3D наноструктур на основі широкозонних сполук АІІВVI. Ці сполуки, маючи цікаві оптичні властивості як у видимому [13], так й у середньому інфрачервоному діапазоні [14], перспективні для одержання на їхній основі 3D наноструктур для оптичних застосувань.

Напружені гетероструктури CdTe/ZnTe з неперервними шарами та розривними шарами квантових точок привертають в останні десять років значну увагу завдяки своїм цікавим фізичним характеристикам і можливостям використання в електронних пристроях [15]. Пружні напруження, котрі виникають через розбіжність у 6.2% параметрів решіток, що сполучаються, так $a = 6.48 \text{ \AA}$ для CdTe і $a = 6.1 \text{ \AA}$ для ZnTe, викликають зміни у їх електронних станах.

Механізм формування квантових точок на основі напівпровідників III – V [10] не слідує моделі Странскі-Крастанова, котра добре описує епітаксціальний ріст структур напівпровідників Ge та Si, а також квантових точок Ge в структурах Ge/Si [11]. Ріст квантових точок CdTe (CdSe) починається з утворення 2D-пластинок, котрі грають роль провісників для формування 3D-островків. Дослідження [15, 16] на скануючому просвітчастому електронному мікроскопі показують, що при товщині слоїв CdSe 1.5 и 1.9 ML (ML – моношар) од-

ночасно співіснують 2D-пластинки та 3D-островки. У зразку товщиною шару 2.6 ML і більше видні тільки добре сформовані квантові точки [8]. Аналогічна картина спостерігається і в структурах CdTe/ZnTe.

Ціль даної роботи полягає в дослідженні електронних властивостей напружених гетероструктур CdTe/ZnTe та гетероструктур з квантовими точками CdTe.

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ

В даній роботі електронні властивості напружених шарів CdTe та ZnTe у гетероструктурах досліджувалися в розрахунках із перших принципів. Результати були одержані за допомогою авторського програмного коду [17], що реалізує квантово-механічну динаміку Кар-Паррінелло з використанням локального наближення функціоналу електронної густини та нормозберігаючого псевдопотенціалу із перших принципів Бечелета, Хеменна, Шльотера або Хартвігсена, Гоедекера, Хьюттера. Основні стани електронно-ядерних систем виявлялися за алгоритмом квантової динаміки, якщо одночасно оптимізувалися змінні електронної та ядерних підсистем, або шляхом діагоналізації матриці Кона-Шема, якщо визначалися тільки електронні змінні при фіксованих атомних остовах. Слідуючи Кону і Шему, електронна густина записувалася в термінах зайнятих ортонормованих одночастинкових хвильових функцій:

$$n(\vec{r}) = \sum_i |\psi_i(\vec{r})|^2. \quad (1)$$

Точка на поверхні потенціальної енергії в наближенні Борна-Оппенгеймера визначалася мінімумом по відношенню до хвильових функцій енергетичного функціоналу:

$$\times \psi_i(\vec{r}) + U[\{n(\vec{r})\}, \{R_j\}, \{\alpha_v\}], \quad (2)$$

де $\{R_j\}$ – координати атомних остовів, $\{\alpha_v\}$ – всі можливі зовнішні впливи на систему.

В загальноприйнятому формулюванні мінімізація енергетичного функціоналу (2) по відношенню до одночастинкових орбіталей при накладених на них додаткових умовах

ортонормування приводить до одночастинкових рівнянь Кона-Шема:

(3)

В даних розрахунках одночастинкова хвильова функція $\psi_i(\vec{r})$ розкладалася в ряд за плоскими хвилями, довжина ряду вибиралася такою, щоб на один атом базису приходилося близько 20 плоских хвиль. В разі пошуку тільки електронних змінних при фіксованих атомних остовах обчислювалася матриця Кона-Шема для рівняння (3) при певному значенні хвильового вектора \vec{k} із зони Бриллюена штучної суперрешітки із тетрагональною елементарною коміркою, атомний базис якої визначав атомну систему, що досліджувалася. Матриця складалася із елементів на операторах кінетичної енергії та іонного псевдопотенціалу, що екранований діелектричною функцією $\epsilon(\vec{r}, \vec{r}', \omega)$ в наближенні Томаса-Фермі. Діагоналізація цієї матриці після приведення її до дійсної тридіагональної форми далі відбувалася, використовуючи QL/QR алгоритм.

Для дослідження еволюції електронних властивостей напружених гетероструктур CdTe/ZnTe та гетероструктур CdTe/ZnTe з квантовими точками CdTe були створені атомні базиси примітивної комірки штучної суперрешітки для відтворення нескінченних у двох напрямках композицій плівок CdTe та ZnTe з поверхнями типу (001) у структурі цинкової обманки. Були розглянуті наступні варіанти:

- 1) стиснута плівка CdTe до параметрів решітки ZnTe товщиною у 2 моношари (1 моношар = 3.05 Å і містить 8 атомів: 4 атоми Cd та 4 атоми Te) між двома плівками ZnTe товщиною по 4 моношари кожна;
- 2) розтягнута плівка ZnTe до параметрів решітки CdTe товщиною у 2 моношари (1 моношар = 3.24 Å і містить 8 атомів: 4 атоми Zn та 4 атоми Te) між двома плівками CdTe товщиною по 4 моношари кожна;
- 3) стиснута плівка CdTe до параметрів решітки ZnTe товщиною у 6 моношарів (1 моношар = 3.05 Å і містить 16 атомів: 8 атомів Cd та 8 атомів Te) між двома плівками ZnTe товщиною по 2 моношари кожна;

- 4) ансамбль квантових точок CdTe у матриці ZnTe, що розташовувалися на стиснутому моношарі CdTe, наступними шарами у їх будові були 2 моношари з параметрами решітки ZnTe, що містили 6 атомів Cd та 2 Zn на примітивну комірку, наступними були 2 моношари, що містили 4 атоми Cd та 4 Zn, і на кінець моношар, що містив 2 атоми Cd та 6 Zn. Вище описана структура розміщувалася між двома плівками ZnTe товщиною по 2 моношари кожна.

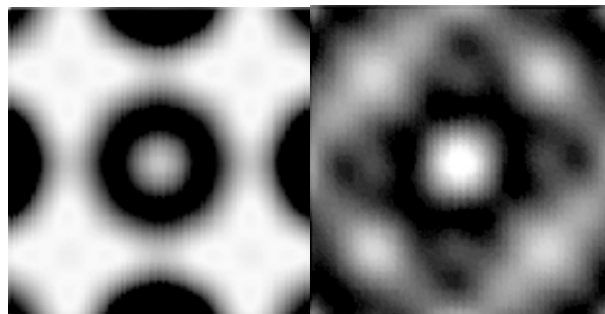
Подалі, для компактності при обговоренні кожного із варіантів будемо їх іменувати номерами, так атомний базис гетеропереходу варіанту № 1 містив 80 атомів, варіанту № 2 – 80 атомів, варіанту №3 містив 160 атомів і, на кінець, варіанту № 4 містив 160 атомів.

При цьому параметри комірки були такими, щоб у напрямках X та Y змодельовати нескінченну довжину плівок, а у напрямку Z – вільні поверхні (001). Кількість валентних електронів для Cd або Zn приймалася 12, з урахуванням 10*d*-електронів попередньої оболонки.

Використовуючи авторське програмне забезпечення, були отримані електронний спектр для Γ – точки зони Бриллюена суперрешітки, просторові розподіли густини валентних електронів та їх перетини.

РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис.1 приводяться перетини просторового розподілу густини валентних електронів паралельно границі розділу гетеропереходу поблизу атомів Cd та Zn для напружених та ненапружених атомних шарів. Видна схожість розподілів а) та г), б) та в), тобто розподіл електронної густини біля атому Cd в нормальних умовах схожий на розподіл біля атому Zn із шару, що перебуває в умовах



а)

б)

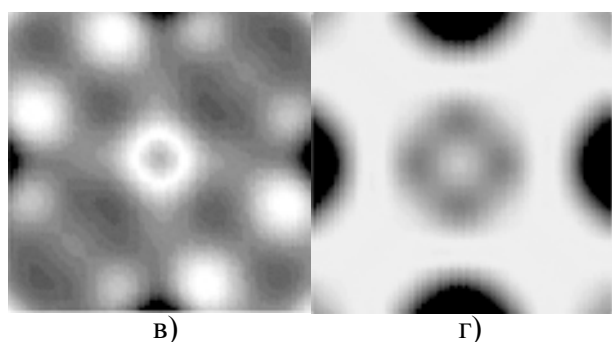


Рис. 1. Перетини просторової густини валентних електронів у площині (100) в околиці атомів для плівок гетеропереходів: а) – поблизу атома Cd ненапруженого шару; б) – поблизу атома Cd напруженого шару; в) – поблизу атома Zn ненапруженого шару; г) – поблизу атома Zn розтягнутого шару.

розтягання, тоді як розподіл біля атому Zn в нормальних умовах схожий на розподіл біля атому Cd із шару, що перебуває в умовах стиснення.

На рис. 2 приводяться перетини просторового розподілу густини валентних електронів поблизу атомів Cd, взятих із різних атомних шарів. Так, на рис. 2а у верхніх рядках знаходяться перетини плівки CdTe, що скла-

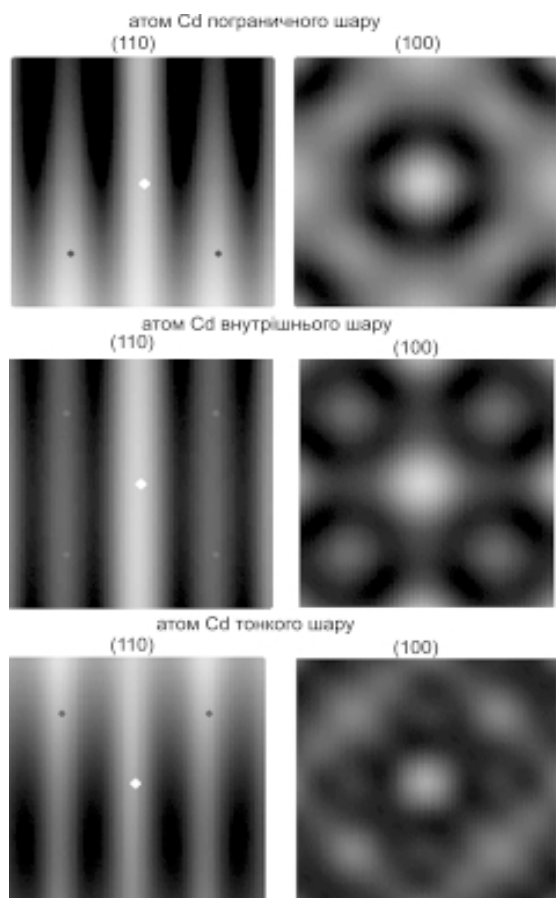


Рис. 2а. Перетини просторової густини валентних електронів у площинах (110) та (100) в околиці атомів Cd для напружених (стиснутих) плівок CdTe гетеропереходів.

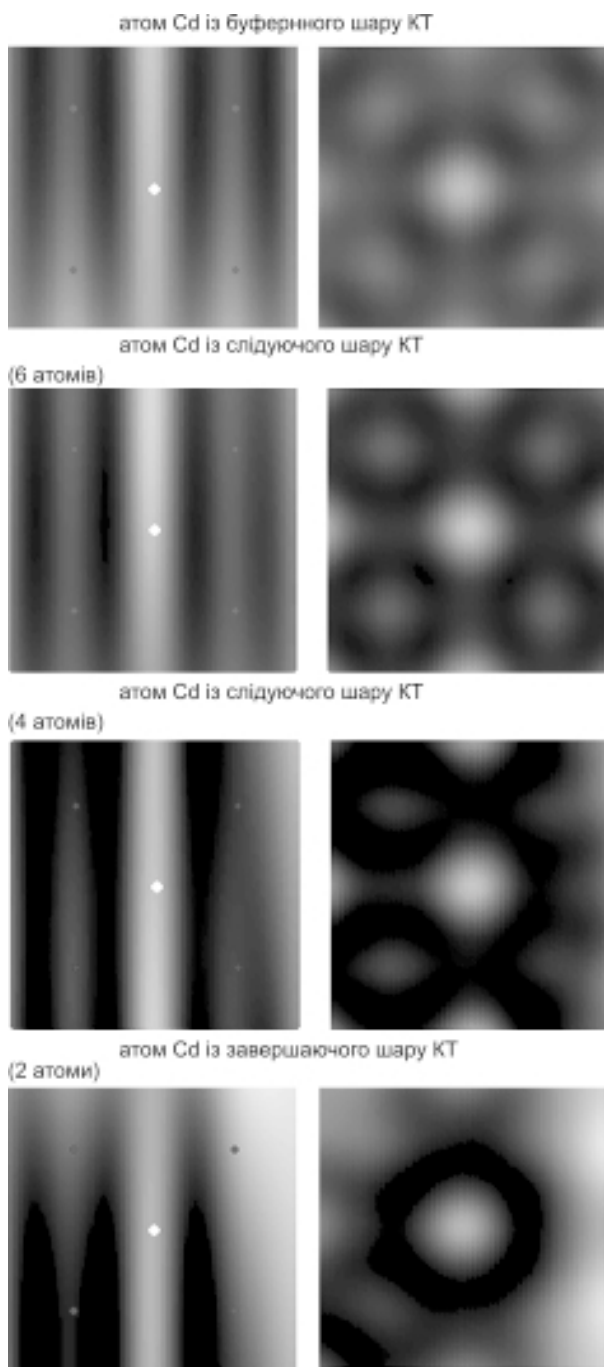


Рис. 2б. Перетини просторової густини валентних електронів у площинах (110) та (100) в околиці атомів Cd для шарів квантових точок CdTe.

дається із 6 моношарів, в котрій можна виділити пограничний із плівкою ZnTe шар та внутрішній, в нижньому ряді приводиться перетин плівки CdTe, що складається всього із 2 моношарів, кожний із яких є пограничним із плівкою ZnTe шаром. На рис. 2б знаходяться перетини квантових точок CdTe, що вбудовані в напруженому стані в матрицю ZnTe, по різним атомним шарам, котрі складають квантову точку: по, так званому “бу-

ферному”, що є суцільним моношаром CdTe, і далі по наступним шарам, котрі представляють собою пластини шарів CdTe в оточенні ZnTe, що зменшуються за розмірами у напрямку вершини квантової точки.

Загальний вигляд плівок гетеропереходів та квантових точок приводиться на рис. 3, із якого можна встановити, що максимальна електронна густина приходить на механічно напружені частини гетеропереходів та квантових точок.

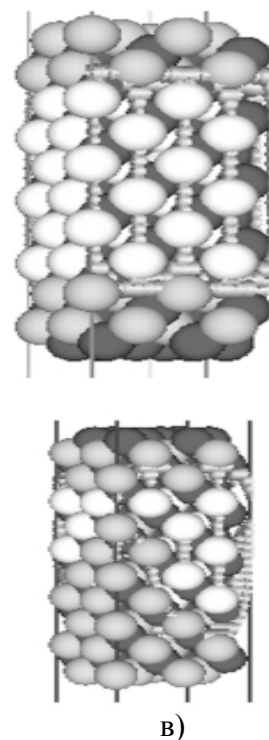
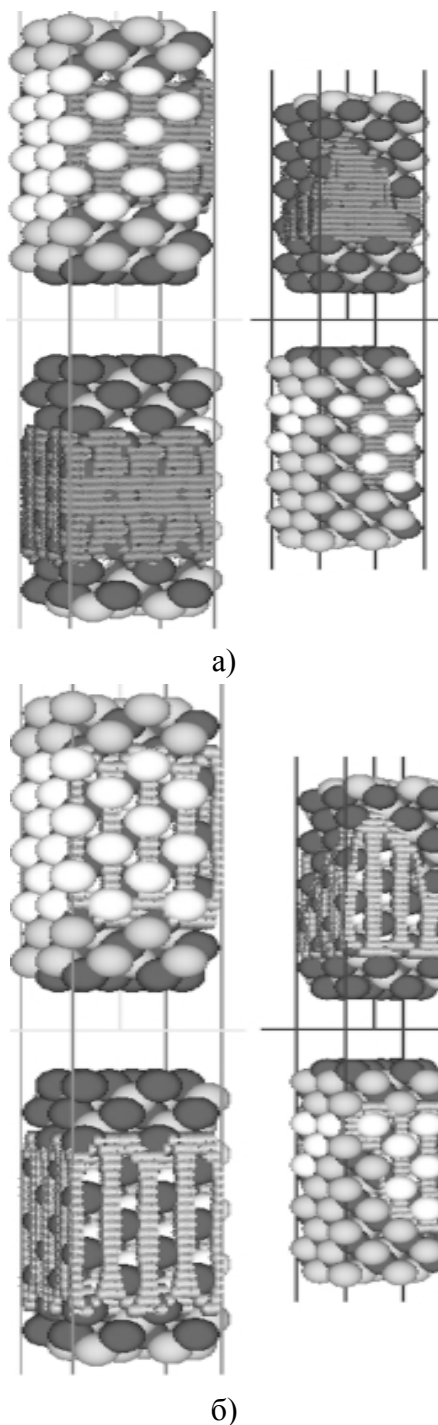


Рис. 3. Просторовий розподіл густини валентних електронів для двох інверсно розташованих плівок, що моделюються атомним базисом варіанту № 3 та варіанту №4: а) – електронна густина, що відповідає відносному значенню (0.8 – 0.9) від максимального значення; б) – електронна густина, що відповідає відносному значенню (0.60.7); в) – електронна густина, що відповідає відносному значенню (0.4 – 0.5). (Білі сфери позначають атоми Cd, сірі – Zn, сині – Te).

Деталі просторового розподілу густини валентних електронів біля вершини квантової

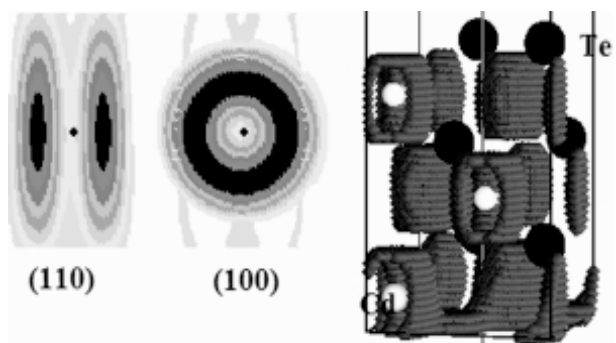


Рис. 4. Просторовий розподіл густини валентних електронів для ізозначення (0.5 – 0.6) та його перетини у взаємно перпендикулярних площинах в околі атома Cd радіусом 1.4 Å для окремої плівки CdTe із 3 моношарів.

точки приводяться на рис. 5. Видно, як квантова точка CdTe окреслюється областями електронної густини інтенсивнішими за загальним зарядом ніж області матриці ZnTe.

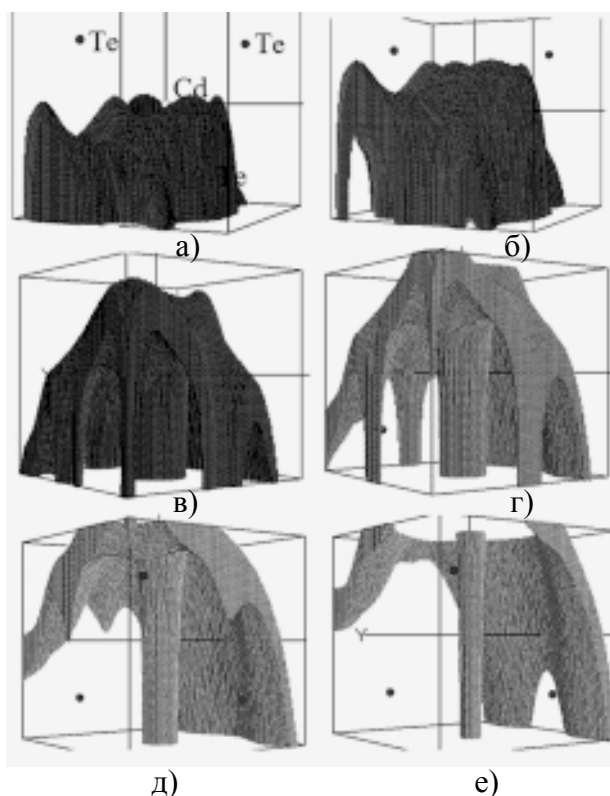


Рис. 5. Просторовий розподіл густини валентних електронів в околиці радіусом 2.8 \AA біля атому Cd із вершини квантової точки: а) – електронна густина, що відповідає відносному значенню (0.9 – 1.0) від максимального значення; б) – електронна густина, що відповідає відносному значенню (0.8 – 0.9); в) – електронна густина, що відповідає відносному значенню (0.7 – 0.8); г) – електронна густина, що відповідає відносному значенню (0.6 – 0.7); д) – електронна густина, що відповідає відносному значенню (0.5 – 0.6); е) – електронна густина, що відповідає відносному значенню (0.4 – 0.5).

На рис. 6 – 10 приводяться просторові розподіли густини валентних електронів для різних ізозначень в околі атомів Cd та Te із атомних шарів гетеропереходу варіанту № 3,

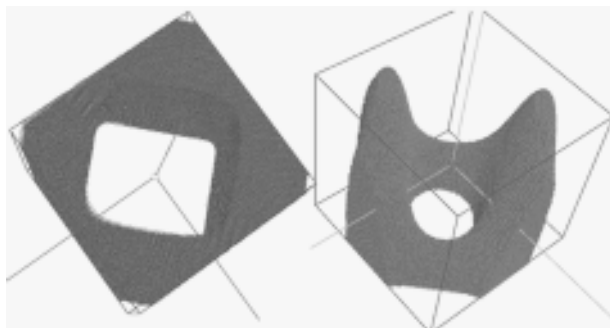


Рис. 6. Просторовий розподіл густини валентних електронів, що відповідає відносному значенню (0.9 – 1.0) від максимального, в околиці радіусом 1.4 \AA біля атомів Cd (зліва) та Te (справа) із внутрішнього шару гетеропереходу варіанту № 3.

огляд охоплює сфери радіусом 1.4 \AA . Для виявлення їх особливостей на рис. 4 приводяться електронні розподіли в поодинокій не-напруженій плівці CdTe на три моношари.

Порівнюючи ці розподіли з розподілами в гетеропереході, видно, що їх сотоподібний характер біля атомів Cd переходить у неперервний, що охоплює всю плівку, для гетеропереходу. Розподіл густини валентних елект-

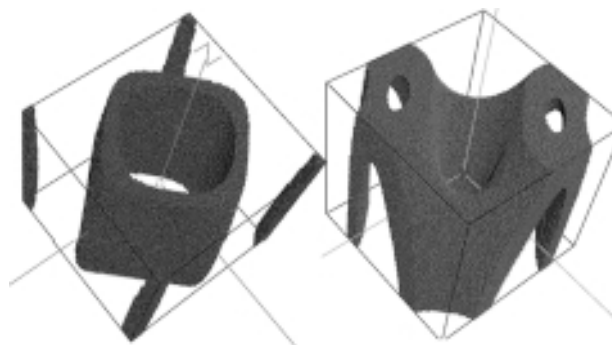


Рис. 7. Просторовий розподіл густини валентних електронів, що відповідає відносному значенню (0.8 – 0.9) від максимального, в околиці радіусом 1.4 \AA біля атомів Cd (зліва) та Te (справа) із внутрішнього шару гетеропереходу варіанту № 3.

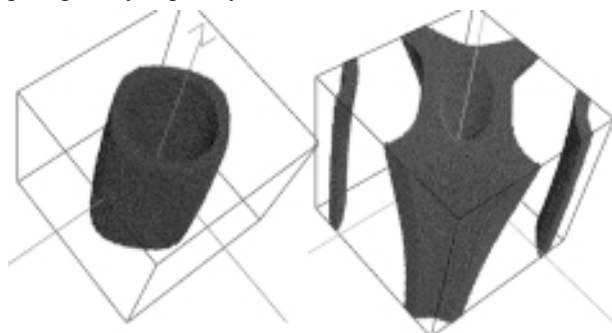


Рис. 8. Просторовий розподіл густини валентних електронів, що відповідає відносному значенню (0.7 – 0.8) від максимального, в околиці радіусом 1.4 \AA біля атомів Cd (зліва) та Te (справа) із внутрішнього шару гетеропереходу варіанту № 3.

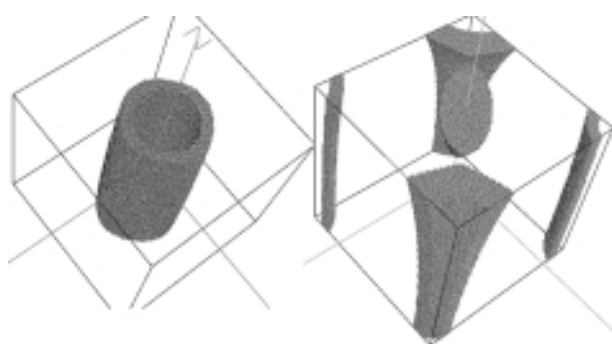


Рис. 9. Просторовий розподіл густини валентних електронів, що відповідає відносному значенню (0.6 – 0.7) від максимального, в околиці радіусом 1.4 \AA біля атомів Cd (зліва) та Te (справа) із внутрішнього шару гетеропереходу варіанту № 3.

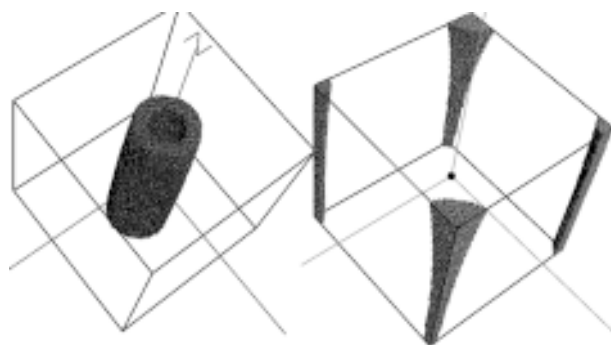


Рис. 10. Просторовий розподіл густини валентних електронів, що відповідає відносному значенню (0.5 – 0.6) від максимального, в околиці радіусом 1.4 Å біля атомів Cd (зліва) та Te (справа) із внутрішнього шару гетеропереходу варіанту № 3.

ронів в гетеропереході отримує такий характер, котрий дозволяє сказати, що він узагальнюється для всіх атомів напружених пластів CdTe, а не тільки найближчої координаційної сфери.

На рис. 11 показано, як проходить розподіл електронів по енергетичним зонам для Г-стану. Цей розподіл отримано шляхом числово-

го обчислення похідної $\lim_{\Delta E \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta E}$, де ΔN – кі-

лькість дозволених станів, що припадають на проміжок енергії ΔE , із отриманого під час діагоналізації матриці Кона-Шема одночастинкового енергетичного спектра, кількість значень в якому контролюється розміром розкладу хвильової функції.

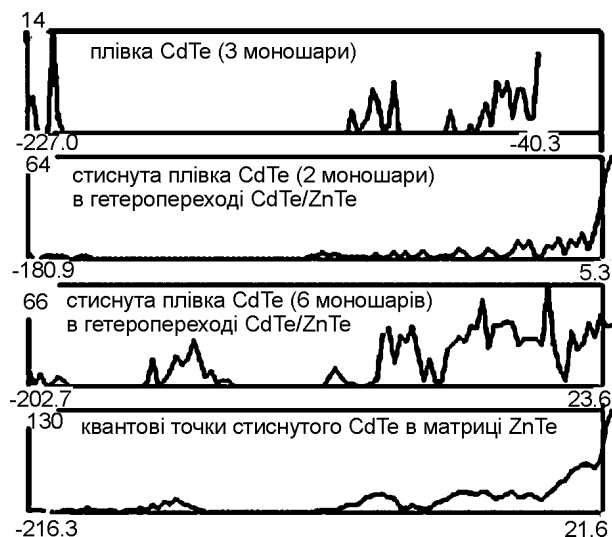


Рис. 11. Густина станів в Г – точці зони Бриллюена суперрешітки для різних станів плівок CdTe. Приводяться тільки зайняті стани – валентна зона. По горизонталі відкладена енергія в атомних одиницях, по вертикалі – кількість станів на елементарний енергетичний інтервал.

Відповідно до ідеології функціоналу електронної густини виявлялися зайняті стани при $T = 0$ К, що дозволяло визначити положення рівня Фермі, прив'язуючись до останнього зайнятого стану, кількість яких визначали половинною кількістю електронів (у зв'язку з неврахуванням спіну електрона). Порівнюючи два останні розподіли – для гетеропереходу з 6 моношаровою стиснутою плівкою CdTe і для нього ж, тільки із розірваною на пластини плівкою CdTe, видно як для останнього варіанту дозволені стани перегруповуються з утворенням максимуму біля рівня Фермі.

ВИСНОВКИ

Методами функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу із перших принципів отримані розподіли густини валентних електронів та електронні енергетичні спектри для напружених гетероструктур CdTe/ZnTe та гетероструктур CdTe/ZnTe з квантовими точками CdTe.

Механічне напруження плівки CdTe суттєво впливає на перебудову розподілу валентних електронів у плівці. Зважаючи на те, що плівка дуже тонка, усього у 6 моношарів, перебудова електронної густини відбувається по усій товщині плівки.

Розподіл густини валентних електронів в гетеропереході отримує такий характер, котрий дозволяє сказати, що він узагальнюється для всіх атомів напружених пластів CdTe, а не тільки найближчої координаційної сфери.

Квантова точка CdTe окреслюється областями електронної густини інтенсивнішими за загальним зарядом ніж області матриці ZnTe.

Дозволені енергетичні стани гетероструктури CdTe/ZnTe з квантовими точками CdTe перегруповуються з утворенням максимуму біля рівня Фермі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Prinz V.Ya., Seleznev V.A., Gutakovskiyetal A.K. //Physica E. – 2000. – Vol. 6. – P. 828.
2. Prinz V.Ya., Chehovskiy A.V., Preobrazenskii V.V., Semyagin B.R., Gutakovskiy A.K.//Nanotechnology. – 2002. – Vol. 13. – P. 231-233.
3. Prinz V.Ya.//Microelectron. Eng.–2003.– Vol. 69. – P. 466-475.

4. Golod S.V., Prinz V.Ya., Mashanov V.I., Gutakovsky A.K.//Semicond. Sci. Technol. – 2001. – Vol. 16. – P. 181-185.
5. Nastaushev Y.V., Prinz V.Ya., Svitashva S.N.//Nanotechnology. – 2005. – Vol. 16. – P. 908-912.
6. Luchnikov V., Stamm M.//Physica E. – 2007. – Vol. 37. – P. 236-240.
7. Fomin V.M., Shiplyuk A.N., Aniskin V.M., Maslov A.A., Pai V.V., Prinz V.Ya., Seleznev V.A.//Doklady Physics. – 2006. – Vol. 51. – P. 132.
8. Schmidt O., Schmarje N., Deneke C., Muller C., Jin-Phillipp N.Y.//Adv. Mater. – 2001. – Vol. 13. – P. 756-759.
9. Schumacher O., Mendach S., Welsch H., Schramm A., Heyn C., Hansen W.//Appl. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 86. – P. 143109.
10. Prinz V.Y., Golod S.V.//J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 2006. – Vol. 47. – P. 867-878.
11. Golod S., Prinz V., Wagli P., Zhang L., Kirfel O., Deckhardt E., Glaus F., David C., Grutzmacher D.//Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 84. – P. 3391.
12. Алышев С.В., Забежайлов А.О., Миронов Р.А., Козловский В.И., Дианов Е.М. Формирование полупроводниковых 3D наноструктур на основе ZnSe//Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, Вып. 1. – С. 75-78.
13. Zabezhaylov A.O., Alishev S.V., Mironov R.A., Vasiliev S.A., Grekov M.V., Dianov E.M.//Proc. 16th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology. (Vladivostok, Russia). – 2008. – P. 23.
14. Alyshev S.V., Zabezhaylov A.O., Mironov R.A., Kozlovsky V.I., Dianov E.M.//Proc. 16th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology. (Vladivostok, Russia). – 2008. – P. 19.
15. Кучеренко И., Виноградов В., Трушин А., Карчевски Г. Влияние толщины слоев CdTe и ZnTe на спектры катодолюминесценции в напряженных сверхрешетках CdTe/ZnTe со слоями квантовых точек//ФТТ. – 2009. – Т. 51, Вып. 11. – С. 2246-2250.
16. Mackowski S. et al.//Phys. Rev. B. – 2004. – Vol. 69. – P. 205325.
17. Балабай Р.М. Обчислювальні методи із перших принципів у фізиці твердого тіла: квантово-механічна молекулярна динаміка. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2009 – 123 с.
3. Prinz V.Ya.//Microelectron. Eng.–2003.– Vol. 69. – P. 466-475.
4. Golod S.V., Prinz V.Ya., Mashanov V.I., Gutakovsky A.K.//Semicond. Sci. Technol. – 2001. – Vol. 16. – P. 181-185.
5. Nastaushev Y.V., Prinz V.Ya., Svitashva S.N.//Nanotechnology. – 2005. – Vol. 16. – P. 908-912.
6. Luchnikov V., Stamm M.//Physica E. – 2007. – Vol. 37. – P. 236-240.
7. Fomin V.M., Shiplyuk A.N., Aniskin V.M., Maslov A.A., Pai V.V., Prinz V.Ya., Seleznev V.A.//Doklady Physics. – 2006. – Vol. 51. – P. 132.
8. Schmidt O., Schmarje N., Deneke C., Muller C., Jin-Phillipp N.Y.//Adv. Mater. – 2001. – Vol. 13. – P. 756-759.
9. Schumacher O., Mendach S., Welsch H., Schramm A., Heyn C., Hansen W.//Appl. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 86. – P. 143109.
10. Prinz V.Y., Golod S.V.//J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 2006. – Vol. 47. – P. 867-878.
11. Golod S., Prinz V., Wagli P., Zhang L., Kirfel O., Deckhardt E., Glaus F., David C., Grutzmacher D.//Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 84. – P. 3391.
12. Alyshev S.V., Zabezhajlov A.O., Mironov R.A., Kozlovskij V.I., Dianov E.M. Formirovanie poluprovodnikovyh 3D nanostruktur na osnove ZnSe //Fizika i tehnikopoluprovodnikov. – 2010. – Т. 44, Vyp. 1. – S. 75-78.
13. Zabezhaylov A.O., Alishev S.V., Mironov R.A., Vasiliev S.A., Grekov M.V., Dianov E.M.//Proc. 16th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology. (Vladivostok, Russia). – 2008. – P. 23.
14. Alyshev S.V., Zabezhaylov A.O., Mironov R.A., Kozlovsky V.I., Dianov E.M.//Proc. 16th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology. (Vladivostok, Russia). – 2008. – P. 19.
15. Kucherenko I., Vinogradov V., Trushin A., Karchevski G. Vlijanie tolshhiny sloev CdTe i ZnTe na spektry katodoljuminescencii v naprjazhennyh sverhreshetkah CdTe/ZnTe so slojami kvantovyh toчек//FTT. – 2009. – Т. 51, Vyp. 11. – S. 2246-2250.
16. Mackowski S. et al.//Phys. Rev. B. – 2004. – Vol. 69. – P. 205325.
17. Balabaj R.M. Obchisljuval'ni metodi iz pershih principiv u fizici tverdogo tila: kvantovo-mehanična molekularna dinamika. – Krivij Rig: Vidavnicij dim, 2009 – 123 s.

LITERATURA

1. Prinz V.Ya., Seleznev V.A., Gutakovskiyetal A.K. //Physica E. – 2000. – Vol. 6. – P. 828.
2. Prinz V.Ya., Chehovskiy A.V., Preobrazenskii V.V., Semyagin B.R., Gutakovsky A.K.//Nanotechnology. – 2002. – Vol. 13. – P. 231-233.