

П.П. Москвін, д.ф.-м.н., проф.

О.А. Гутніченко, к.т.н., доц.

В.Б. Крижанівський, к.ф.-м.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

Л.В. Рашковецький, н.с.

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Е. Лашкарьова НАН України

## ФРАКТАЛЬНА ГЕОМЕТРІЯ ПОВЕРХНІ ГЕТЕРОСТРУКТУР $Cd_xHg_{1-x}Te - Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$ , ЩО СФОРМОВАНІ ОСАДЖЕННЯМ З РІДКОЇ ФАЗИ

Метами атомно-силової мікроскопії (AFM-спектроскопія) досліджена поверхня гетероструктури  $Cd_xHg_{1-x}Te - Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$ , що сформована осадженням шарів з рідкої фази. Оцифроване зображення поверхні оброблялося методами мультифрактального аналізу. Обчислені мультифрактальні параметри, що характеризують стан поверхні структури (числа Реньї та мультифрактальні міри упорядкування). Виявлена фрактальна симетрія (Ф-симетрія) поверхні гетероструктури. Порівняння величин мультифрактальних параметрів шарів, які досліджено в роботі, з аналогічними параметрами високоякісних структур на основі напівпровідникових нітридів  $A^3B^5$ , показало меншу величину мультифрактальної міри впорядкованості структури поверхні гетерокомпозиції. Застосування фрактальної геометрії до оцінок вільної поверхневої енергії Гіббса фази показало, що використання такої геометрії відкриває можливість домогтися обмеження по величині поверхневих термодинамічних функцій системи, які в рамках класичної геометрії, катастрофічно швидко зростають по мірі зменшення розмірів частинок середовищ, що беруть участь у міжфазній взаємодії.

**Вступ.** Структурна досконалість шарів на мікро- та макрорівнях багато в чому визначає ефективність функціонування оптоелектронних приладів. Умови отримання багатьох сучасних приладів нерівноважні і супроводжуються процесами самоорганізації на нано- та мікрорівнях. У результаті виникає складна внутрішня структура, властивості якої визначаються не тільки щільністю точкових і протяжних дефектів, але, більшою мірою, характером зв'язку частин такої структури в єдине ціле. У таких структурах традиційні методи опису їх стану не відображають повною мірою їх особливі структурні властивості, що нерідко призводить до відсутності прямої кореляції між ними і оптичними та електричними властивостями всієї системи. Прикладом таких приладів зі складною структурою є високоефективні світлодіоди на основі нітридів III-групи, гетероструктури з квантовими точками [1].

Існуючий сильний взаємозв'язок між електрооптичними параметрами шарів і станом їх поверхні передбачає вивчення впливу технологічних умов отримання плівки на цей стан. Останнє означає, що при термодинамічному описі процесу формування таких структур необхідно брати до уваги наявність поверхневої компоненти вільної енергії системи. У той же час, саме при формуванні структур з характерними розмірами елементів від часток мікрона до нано починають проявлятися фізичні та математичні труднощі в термодинамічному описі системи, коли багато термодинамічних функцій фази починають необмежено зростати. Прикладом такої ситуації є різке зростання розрахункової величини вільної поверхневої енергії Гіббса, величина якої при розрахунку за класичною формулою  $G_s \sim \alpha_s / r$  при зменшенні характеристичних розмірів часток взаємодіючих фаз  $r$  починає на кілька порядків перевищувати величини компонентів рівнянь, що описують хімічну взаємодію. В даний час такий стан з оцінкою величини поверхневої енергії досить часто пояснюють невизначеністю самої величини питомої вільної енергії Гіббса для різних міжфазних границь в умовах протікання процесу синтезу. У той же час представляється малоймовірним, що корекція величини зазначеної енергії тільки за рахунок врахування її залежності від температури, величин, що виникають у системі внутрішніх тисків, або складу матеріалу, дозволить вирішити ситуацію, що склалася.

Як перспективний підхід при термодинамічному описі системи, де непланарність міжфазних границь істотно впливає на енергетичний стан фаз, можна визнати врахування в аналізі фрактальної геометрії поверхонь розділу (фрактальність границі розділу). Це дозволить скорегувати функціональну залежність поверхневої енергії від її геометричних форм і, тим самим, відкриє перспективу відходу від появи різко зростаючих функцій при моделюванні енергетичного стану міжфазної границі.

Поставлена задача передбачала використання нових способів опису стану поверхні шарів і, зокрема, їх геометричних форм. У роботах [1–3] для отримання кількісних характеристик стану поверхні плівки використовувалася концепція мультифракталів. Останнє дозволило здійснити так звану мультифрактальну параметризацію (розрахувати параметри фрактальної структури) поверхні і

обґрунтувати застосування даних такого аналізу при пошуку взаємозв'язків між ними і електрофізичними, кристалографічними та механічними властивостями матеріалів.

У даній роботі засоби фрактальної геометрії будуть застосовані до опису поверхневого стану шарів гетероструктур  $Cd_xHg_{1-x}Te - Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$  ( $x \approx 0,21$ ). Саме така гетерокомпозиція, в якій реалізовано практично повне узгодження періодів кристалічних ґраток, сполучених матеріалів, забезпечує високі фоточутливі властивості в дальній інфрачервоній області спектра ( $\lambda = 8-14$  мкм). За нашими даними подібного роду дослідження поверхні плівок зазначених твердих розчинів, які вирощені з рідкої фази, не проводилися. В літературі повідомляється лише про використання для аналізу морфології поверхні плівок традиційних методів – таких, як растрова електронна мікроскопія, профілометрія.

**Викладення основного матеріалу. Експериментальні результати і методика обробки даних.** Технологічний процес осадження з рідкої фази шарів твердого розчину  $Cd_xHg_{1-x}Te$  на підкладку з твердого розчину  $Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$  описаний в [4]. Важливою його особливістю, яка багато в чому визначає отримані результати, є застосування способу ростової системи, яка обертається, для повного видалення залишків розплаву після процесу осадження. Це забезпечувало дзеркальну поверхню вирощених шарів і не вимагало додаткової її обробки для подальшого аналізу. Шари осаджувалися при температурі 550 °С і переохолодженні розплаву від 5 до 10 °С. Використовувалася підкладка з кристалографічної орієнтацією (111) В.

Поверхня шарів аналізувалася методами атомно-силової мікроскопії (AFM-спектроскопії) на мікроскопі Nanoscope D3000 (Digital Instruments). Отримані AFM фотографії і відповідні їм масиви цифрової інформації оброблялися на ЕОМ з метою виявлення фрактальної структури поверхні шару. Для цього використовувалися як стандартні обчислювальні програми обробки AFM зображень ("Gwyddion"), так і спеціальна програма "MFRDrom", що забезпечує отримання кількісних даних про фрактальну структуру поверхні, яка досліджується. Остання із зазначених програм була розроблена В.Г. Встовським у лабораторії міцності металевих матеріалів ІМЕТ РАН і призначалася для аналізу поверхневих властивостей металів. Спільне застосування зазначеного програмного забезпечення дозволило отримати кількісну інформацію про параметри фрактальної структури поверхні гетероструктур  $Cd_xHg_{1-x}Te - Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$ .

Послідовність обробки AFM зображень полягала в такому. Цифрова фотографія, отримана методом AFM-спектроскопії (рис. 1, а), оброблялася за допомогою стандартного програмного забезпечення "Gwyddion". У середовищі цієї програми здійснювалася корекція і попередня обробка зображення і, головне, ця процедура виявилася необхідною для забезпечення програмного суміщення переданих масивів цифрового зображення від ЕОМ мікроскопа в середовище програми фрактальної обробки. Крім цього, програма "Gwyddion" сама по собі оснащена достатнім математичним забезпеченням, яке також дозволяє виконувати розрахунки параметрів фрактального стану поверхонь, які спостерігаються. Саме в середовищі цієї програми були отримані оціночні дані про фрактальні розмірності об'ємної картини AFM зображення.

Програма "MFRDrom" дозволяє отримати чорно-біле фрактальне зображення і здійснити розрахунок його параметрів у рамках стандартного мультифрактального формалізму [2, 5]. В рамках цих уявлень досліджуваний об'єкт моделюється набором взаємопроникних множин, кожна з яких має свою розмірність. При цьому пошук основних параметрів мультифрактального стану, згідно з [5, 6], здійснюється шляхом мінімізації такого функціонала:

$$\chi(q) = \int d\alpha \rho(\alpha) I^{-f(\alpha)} I^{q\alpha}. \quad (1)$$

Цей функціонал був побудований з таких міркувань. Підінтегральна компонента  $d\alpha \rho(\alpha) I^{-f(\alpha)}$  є операцією розрахунку ймовірності того, що розмірність шуканої множини (з можливого спектра фрактальних розмірностей  $f(\alpha)$ , де  $\alpha$  – параметр степеневого масштабу (скейлінга),  $\rho(\alpha)$  – функція щільності ймовірності відповідного розподілу) буде належати інтервалу від  $\alpha$  до  $\alpha + d\alpha$ . Наступна компонента виразу  $I^{q\alpha}$  ( $q$  – показник степеня дискретної кореляційної функції  $\chi(q) = \sum_{i=1}^N \mu_i^q$ ,  $\mu_i$  – відносна міра об'єкта в  $i$ -ий комірці оброблюваного простору,  $\sum_{i=1}^N \mu_i = 1$ ) відповідає величині, яка усереднюється інтегруванням.

Свого мінімального значення вказаний інтеграл досягає, коли мінімальною стає величина показника степеня його підінтегральної функції. Це відповідає умові:

$$\frac{d\tau}{d\alpha} = 0, \quad \tau = q \cdot \alpha - f(\alpha). \quad (2)$$

Мінімальне значення функції  $\tau(q)$  безпосередньо пов'язане з узагальненими розмірностями Реньї  $D_q$ . Як показано в [2, 5] саме ці параметри в рамках мультифрактального формалізму є хаусдорфовою

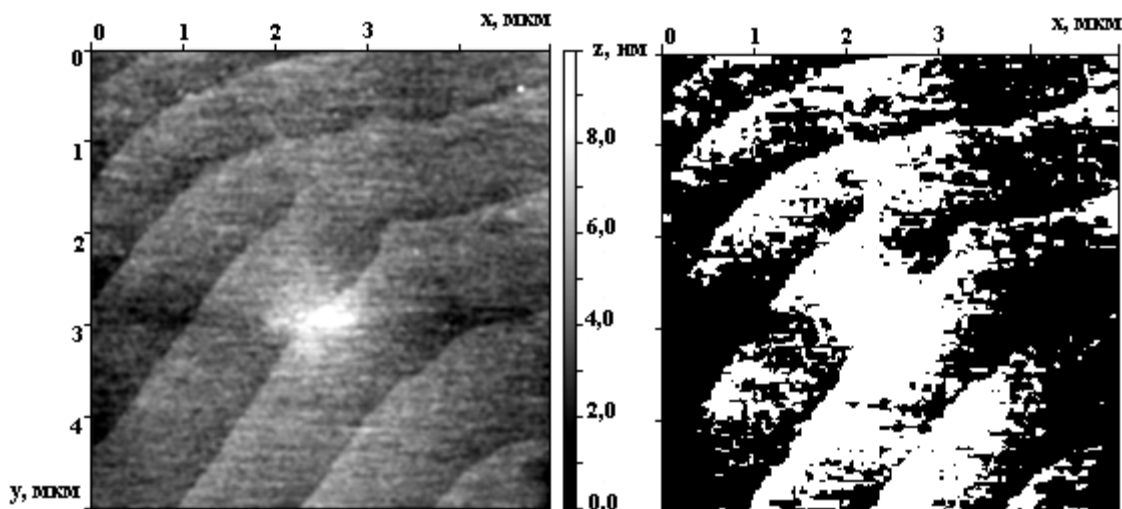
$D_{q=0} = D_0$ , інформаційною  $D_1$  та кореляційною  $D_2$  розмірностями системи. Чисельні значення цих параметрів є результатом роботи програми мультифрактального аналізу. Представлені основні математичні вирази мультифрактального аналізу лежать в основі функціонування програми “MFRDrom”, використаної в даних розрахунках.

При обробці AFM зображень під  $\mu_i$  слід розуміти величину, яку отримуємо нормуванням числового індексу кольору  $i$ -го пікселя в палітрі на суму індексів кольорів усіх пікселів. Математично це відповідає такій формулі:  $\mu_i = N_i / \sum_{i=1}^K N_i$ , де  $K$  – число пікселів у зображенні,  $N_i$  – числовий індекс  $i$ -го пікселя в палітрі.

Пошук параметрів мультифрактального розподілу здійснювався на основі методу розбиттів з однаковими комірками всієї цифрової множини  $\mu_i$ , яка відповідає зображенню поверхні. Відповідно до цього методу, для кожного з обраних розмірів комірок виконуються розрахунки дискретних значень функції  $\chi(q)$  за формулою (1) на базі наявних величин  $\mu_i$ . Максимальний степінь степеневого розкладу  $q_{max}$  був вхідним параметром розрахунків. Це дозволяло програмно сформувати масив  $\tau(q)$ , який потім використовувався для отримання параметрів лінійної залежності  $\tau(q)$ , відповідно до формули (2). Обробка даних цього масиву методом найменших квадратів дозволяла знайти кутовий коефіцієнт залежності, який ототожнюється з  $\alpha$ , а також виконати кореляційну оцінку якості апроксимації. Останнє здійснювалося шляхом розрахунку коефіцієнта кореляції для кожної з одержуваних лінійних залежностей і для наочності ілюструвалося побудовою графіків. Така процедура повторювалася для кожних нових розмірів комірок, на які розбивався масив відносної міри об’єкта  $\mu_i$ . Отримувані таким способом масиви параметрів степеневого масштабу  $\alpha$  служили безпосередньою основою для подальшого розрахунку мультифрактальних характеристик системи, відповідно до представлених вище виразів або формул з [2, 5].

На рисунку 1, а представлено AFM зображення поверхні епітаксialної плівки системи  $Cd - Hg - Te$ , осадженої на підкладці  $Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$ . Розмір відсканованої ділянки склав  $5 \times 5$  мкм, а типова глибина рельєфу поверхні шару виявилася на рівні 10 нм. Результати роботи програми “MFRDrom” за AFM зображенням дозволили отримати таку фрактальну картину її поверхні (рис. 1, б).

На рисунку 1, б виразно спостерігається фрактальна структура поверхні епітаксialної плівки. Як і в роботах [1–3] як найбільш інформативні параметри фрактальної структури поверхні було обрано число Реньї  $D_0$  і параметр упорядкованості  $\Delta_{q \rightarrow \infty} = D_1 - D_{q \rightarrow \infty}$  (ступінь порушення фрактальної симетрії [2]). У розрахунках цієї роботи параметр  $q$  обмежувався значенням  $q = 180$ . Тестові розрахунки показали, що результати розрахунків практично не змінювалися, починаючи від  $q = 140$  і подальше його збільшення не позначалося на розглянутих характеристиках системи. Для зображення на рисунку 1, зазначеним чином були отримані такі значення параметрів  $D_0 = 1,791$ ,  $\Delta_{180} = -0,130$ .



а)

б)

Рис. 1. AFM зображення поверхні структури  $Cd_xHg_{1-x}Te - Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$  (а) та її апроксимоване зображення перед обробкою фотографії методами мультифрактального аналізу (б). Розрахункові величини мультифрактальних параметрів для даного зображення:  $D_0 = 1,791$ ,  $\Delta_{180} = -0,130$

**Обговорення результатів.** Програма фрактального аналізу “MFRDrom” дозволяє не тільки розраховувати параметри мультифрактальних спектрів  $f(\alpha)$ , але аналізувати і класифікувати отримані з них дані. На рисунку 2 представлено типові форми залежностей, що характеризують досліджувану поверхню в мультифрактальному наближенні. Так на рисунку 2, а дана залежність чисел Реньї  $D_q$  від параметра степеневого розкладу  $q$ , а рисунку 2, б представляє спектр фрактальних розмірностей  $f(\alpha)$ . Відповідно до класифікації [2], одержувані в роботі спектри слід інтерпретувати як псевдоканонічні. Для цих спектрів характерно  $D_0 \leq D_1 \leq \dots \leq D_q$ , тобто послідовність чисел Реньї є зростаючою, а спектри фрактальних розмірностей мають явно виражений мінімум. Для таких спектрів характерна від’ємна величина параметра впорядкованості  $\Delta_q$ . Корисно зазначити, що для канонічних спектрів у аналогічних залежностях чисел Реньї від параметра  $q$  характерна зворотна тенденція, тоді як на функції спектра фрактальних розмірностей повинен спостерігатися максимум. Згідно з рекомендаціями [2], в даній роботі робилася спроба шляхом варіації величини параметра  $q$  від  $q = 40$  до  $q = 200$ , отримати в результаті розрахунків канонічну форму мультифрактального спектра з спадною послідовністю  $D_q$  і функціями  $f(\alpha)$ , що мають максимум. Однак це реалізувати не вдалося. З усієї сукупності одержаних у результаті розрахунків спектрів не було виявлено жодного, який би відповідав своїй канонічній формі. У той же час попередня обробка AFM зображень поверхонь плівок  $Zn_xCd_{1-x}Te$ , осаджених на підкладках  $CdTe$  показала наявність як канонічного, так і псевдоканонічного спектрів. Зазначимо, що такі гетероструктури не є ізоперіодичними і, отже, осаджена плівка формується в пружно напруженому стані. Це дозволяє обережно припустити, що саме псевдоканонічний спектр є типовим для поверхонь ізоперіодичних гетероструктур такого роду і сформованих кристалізацією з рідкої фази.

Представляється корисним порівняти отримані в роботі результати з даними застосування мультифрактального аналізу до опису стану поверхонь високоякісних гетерокомпозицій на основі напівпровідникових нітридів  $A^3B^5$  [1]. Ці структури призначені для роботи в високоефективних світлодіодах, випромінюючих біле світло. Параметром порівняння фрактальних структур була обрана величина ступеня впорядкованості  $\Delta_q$ . Так для структур класу  $A^3B^5$ , сформованих епітаксією з металоорганічних сполук, величина параметра знаходилася на рівні  $\Delta_q \approx 0,34-35$ . Ця величина значно перевищує аналогічну і отриману в даній роботі для ізоперіодичної структури  $Cd_xHg_{1-x}Te - Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$ , яка склала за модулем величину на рівні  $\Delta_q \approx 0,13$ . Це означає істотно менші порушення локальної симетрії в цих структурах і більш високу ступінь їх впорядкованості.

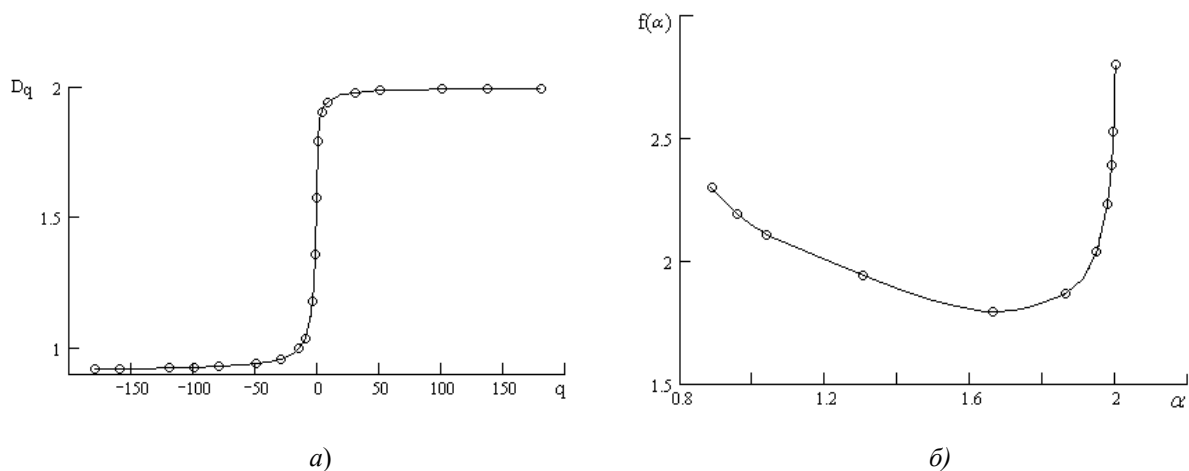


Рис. 2. Псевдоканонічні мультифрактальні спектри AFM зображення, представленого на рисунку 1: а – залежність чисел Реньї  $D_q$  від параметра степеневого розкладу  $q$ ; б – мультифрактальний спектр поверхні  $f(\alpha)$

Мабуть, в таких методах епітаксії з рідкої фази, коли дилатаційна невідповідність періодів кристалічних ґраток сполучених матеріалів повністю компенсується появою полів пружних напружень (когерентне сполучення шару й підкладки) і зростаюча плівка, в першу чергу, успадковує періодичне силове поле підкладки, отриманий результат слід визнати очікуваним. Таке зростання шару, природно, супроводжується збереженням кристалографічних (геометричних) параметрів підкладки. У той же час поява на такому періодичному тлі в невеликих кількостях інших геометричних структур, а саме, властивих фрактальній симетрії, можна розглядати як наслідок дії кінетичних, що розвиваються у часі, нерівноважних процесів, що протікають при кристалізації матеріалу. Зазначимо також, що, в цілому, для кристалізації матеріалу з рідкої фази є типовим незначне відхилення ростової системи від свого термодинамічно рівноважного стану. Дійсно, наближення діаграми стану системи в більшості ситуаціях служить хорошим наближенням при виборі параметрів проведення епітаксіальних процесів [6]. На невисоку ступінь фрактальної симетрії в сильно нерівноважних процесах вказують і автори [2], коли аналізують реалізацію високого ступеня фрактальної симетрії для рівноважного розподілу Больцмана. Висловлені міркування, на нашу думку, можуть служити поясненням ситуації, коли діапазон фрактальних розмірностей для розглянутих структур, які проявляють свою Ф-симетрію, не дуже великий. У той же час для високоякісної гетероструктури  $A^3B^5$  таке геометричне спадкування у своїй структурі параметрів сапфірової підкладки, мабуть, не є значним. В цьому відношенні стає зрозумілим і обґрунтованим застосування терміна “квазіепітаксія” до зростання шарів в [1].

Для оцінки величини фрактальної розмірності об’ємного зображення, представленого на рисунку 1,  $a$ , використовувалася стандартна програма “Gwyddion”. Обираючи, як найбільш простий спосіб розрахунку фрактальної розмірності системи метод підрахунку кубів, за цією програмою для зазначеної структури була отримана розмірність  $D_V = 2,34$ . Подібний розрахунок фрактальної розмірності для рисунка 1,  $a$  був так само виконаний з використанням триангуляційного методу, методу декомпозиції і шляхом розрахунку спектра потужності [5]. Природно, що фрактальні розмірності для цих випадків розрахунку відрізнялися як між собою, так і з представленим вище результатом. У той же час кореляційні графіки при виявленні розмірності системи, які в обов’язковому порядку супроводжують результати фрактального аналізу, показують, що при вирівнюванні залежностей у логарифмічних координатах саме метод підрахунку кубів забезпечує найкращу кореляцію між дискретними даними і прямою лінією, яка їх усереднює.

Представляється корисним оцінити перспективу подальшого використання даних про фрактальну параметризацію поверхонь тонких плівок при виконанні термодинамічного опису їх стану. Дійсно, поява інших розмірностей в описі геометричної конфігурації поверхонь розділу фаз повинно відобразитися на математичній формі виразу для розрахунку поверхневої вільної енергії. Відомо, що додаткова компонента вільної енергії системи, пов’язана з появою границь розділу в системі, може бути розрахована за виразом:  $dG_S^{ex} = dA_S = \alpha \cdot dS$ , де  $dG_S^{ex}$ ,  $dA_S$ ,  $\alpha$ ,  $dS$  – зміна вільної енергії Гіббса, за рахунок появи границі розділу;  $dA_S$ ,  $\alpha$ ,  $dS$  – робота для утворення поверхні розділу площею  $dS$  і  $\alpha$  питома поверхнева енергія границі розділу. Зазначимо, що, якщо використовувати традиційні співвідношення між площею поверхні, об’ємом фази і її характеристичними розмірами, то при перерахунку від об’єму фази ( $dS / dV \sim 1 / r$ ) до її площі поверхні з кривизною  $r$ , можна отримати класичну формулу для оцінки величини компоненти вільної енергії границі розділу у вигляді:  $dG_S^{ex} \sim \alpha / r$ . З наведеного виразу випливає, що при зменшенні кривизни поверхні (або її локальної непланарності) до часток мікрона або декількох нанометрів, розрахункова величина цієї компоненти енергії починає приймати не виправдано великі і важко інтерпретовані значення. У той же час використання уявлень про фрактальну структуру границі розділу і згідно з отриманими оцінками ( $S \sim r^{D_s}$ ,  $V \sim r^{D_v}$ ), можна отримати такий оціночний вид функції для розрахунку величини вільної енергії границі розділу:

$$dG_S^{ex} \sim \alpha / r^{D_v - D_s}. \quad (3)$$

При цьому різниця розмірностей, за отриманими наближеними попередніми оцінками складає величину:  $D_v - D_s \sim 2,35 - 1,79 = 0,56$ . Розуміючи, що зазначені фрактальні розмірності знайдені з використанням абсолютно різних математичних процедур, одна з яких ґрунтується на уявленнях про мультифрактальну структуру поверхні, а інша на пошуку параметра однофрактальної поверхні, все ж можна припустити наступне. Рівняння, що описує поверхневу енергію границі розділу з урахуванням її фрактальної структури, зростає зі зменшенням характерного розміру елемента структури істотно повільніше, порівняно з розрахунками, що виконуються за класичною формулою. Це дозволяє висловити припущення, що використання виразу виду (3) для розрахунку енергії поверхонь зі складною

фрактальною структурою дозволить виключити з розгляду швидко зростаючі, зі зменшенням розмірів елементів поверхні, функції і виконати коректну оцінку енергетичного стану поверхонь розділу фаз.

**Висновки.** Отримані AFM зображення поверхні епітаксальної гетероструктури  $Cd_xHg_{1-x}Te - Zn_{0.04}Cd_{0.96}Te$ , вирощеної з власної рідкої фази. Методом мультифрактального аналізу описано стан поверхні структури та знайдено її фрактальні параметри. Показано, що поверхня структури, вирощеної з рідкої фази, має меншу величину мультифрактальної міри упорядкованості, порівняно зі структурами плівок твердих розчинів нітридів сполук  $A^3B^5$ , що сформовані методами нанотехнологій. Показана необхідність подальшого підвищення ефективності роботи обчислювальних програм для підвищення достовірності одержуваної розрахункової інформації про мультифрактальну структуру поверхні напівпровідникових шарів.

#### Список використаної літератури:

1. Шмидт Н.М. Полупроводниковые самоорганизованные наноматериалы – нелинейные системы с фрактальной размерностью : автореф. ... докт. физ.-мат. наук / Н.М. Шмидт. – СПб. : ФТИ ім. А.Ф. Йоффе, 2009. – 35 с.
2. Встовский Г.В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов / Г.В. Встовский, А.Г. Колмаков, И.Ж. Бунин. – М. : Центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – С. 116.
3. Встовский Г.В. Элементы информационной физики / Г.В. Встовский. – М. : МГИУ, 2002. – 260 с.
4. Когерентные фазовые равновесия в системе Zn-Cd-Te и жидкофазная эпитаксия упругодеформированных слоев твердых растворов  $ZnxCd_{1-x}Te$  / П.П. Москвин, Л.В. Рашковацкий, Ф.Ф. Сизов и др. // Физика и техника полупроводников. – Т. 45, Вып. 7. – 2011. – С. 46.
5. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М. : Мир, 1991. – 259 с.
6. Кузнецов В.В. Неравновесные явления при жидкостной гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов / В.В. Кузнецов, П.П. Москвин, В.С. Сорокин. – М. : Металлургия, 1991. – 174 с.

МОСКВИН Павло Петрович — доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

— фізика та технологія складних напівпровідників.

ГУТНІЧЕНКО Олександр Анатолійович — кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

— фізика поверхні;

— технологічні і фізичні процеси, що відбуваються при обробці поверхонь.

КРИЖАНІВСЬКИЙ В'ячеслав Борисович — кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри програмного забезпечення обчислювальної техніки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

— комп'ютерне моделювання;

— фізика поверхні.

РАШКОВЕЦЬКИЙ Любомир Васильович — науковий співробітник інституту фізики напівпровідників ім. В.Е. Лашкарьова НАН України, м. Київ.

Наукові інтереси:

— технологічні процеси отримання складних напівпровідникових сполук.

Стаття надійшла до редакції 22.05.2012