

<sup>1</sup>Науково – виробниче об'єднання «Селен» НАН Азербайджану  
вул.Фікрета Агасва, 14, Баку, 394975, Азербайджан

<sup>2</sup>Азербайджанський технічний університет, пр. Гусейн Джавіда, 25,  
Баку, AZ 1073, Азербайджан

Гянджинський державний університет, пр. Ісмаїла Хатаї, 187,  
Гянджа, AZ 2000, Гянджа

## ПОВЕРХНЕВІ НАНОЧАСТИНКИ В $A^V_2B^{VI}_3$

*Наночастинки, що формуються на поверхні (0001) в  $A^V_2B^{VI}_3$  становлять особливий клас нанооб'єктів, що впливають на властивості об'ємних кристалів. Їхня агрегація в просторі  $Te^{(I)}-Te^{(I)}$  відбувається при злипанні атомів, що дифундують, по тими ж механізмах, що й у відомих твердотільних структурах сформованих на вільній поверхні кристалів. Аналіз структури й морфології нанофрагментів проведений на основі АСМ-зображень і рентгендифрактометричних знімків на поверхні (0001)  $A^V_2B^{VI}_3$  виявив роль ван-дер-Ваальсової щільності як твердофазного нанореактора в процесі інтеркалізуваня для  $Sb_2Te_3 <Cr>$  і твердого розчину  $(Bi_2Te_3-Bi_2Se_3) <ZnSe>$ .*

**Ключові слова:** рентгендифрактометричний знімок, розведені магнітні напівпровідники, фрактальні кластери, нанореактори

*Nanoparticles formed on (0001)  $A^V_2B^{VI}_3$  surface are a specific class of nanoobjects affecting the properties of the bulk crystals. Their clustering in  $Te^{(I)}-Te^{(I)}$  space occurs with aggregation of diffusing atoms according to the same mechanisms as in known solid-state structures formed on the free surface of crystals. Analysis of nanofragment structure and morphology conducted on the basis of AFM images and X-ray diffraction images on (0001)  $A^V_2B^{VI}_3$  surface has revealed the role of van der Waals gap as a solid-phase nanoreactor during intercalation for  $Sb_2Te_3 <Cr>$  and  $(Bi_2Te_3-Bi_2Se_3) <ZnSe>$  solid solution.*

**Key words:** X-ray diffraction image, diluted magnetic semiconductors, fractal clusters, nanoreactors.

### Вступ

Пошук шляхів збільшення термоелектричної ефективності речовин, крім фундаментального значення, має й прикладне значення для вирішення практичних завдань одержання низьких температур термоелектричними методами.

Дотепер було встановлено, що розведені магнітні напівпровідники (РМПП) на основі елементів III й V або II й IV груп періодичної системи елементів переходять при низьких температурах у феромагнітний стан. Зовсім недавно був відкритий феромагнетизм у теллуридіві вісмуту з Fe, після чого в теллуридіві сурми з V при низьких температурах. Виявлено вплив магнітних домішок на термоЕРС, опір, магнетизм, ефект Холла, ефект Шубнікова-де Газа й інші властивості таких кристалів [1].

Дослідження матеріалів, що володіють високою термоелектричною ефективністю в цей час особливо актуально. Оптимальні величини параметрів досягаються введенням різних легуючих

домішок. При цьому для досягнення великого значення термоелектричності необхідно вивчити фундаментальні фізичні властивості матеріалів.

Як легуючі домішки можна використати *Cr*, *Zn*. Однак до теперішнього часу практично мало вивчений вплив цих домішок на енергетичний спектр змішаних кристалів  $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$ , були відсутні дані про термоелектричну ефективність РМПП на основі теллурида сурми й вплив магнітних домішок на осциляційні властивості таких кристалів. Відсутні дані про термоелектричні властивості змішаних кристалів  $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$  легованих хромом. Не визначена прямими методами анізотропія поверхні Фермі монокристалів  $p$ - $(Bi_{1-x}Sb_x)$  і кристалів типу  $Bi_2Te_3$ .

У роботі досліджені зразки трьох типів .

Зразки першого типу – це змішані монокристали телуридів вісмуту й сурми, як нелеговані, так і леговані. Другий тип – це монокристали телуриду сурми, леговані магнітною домішкою хромом. Третій тип – це монокристали телуриду й селеніду вісмуту, леговані залізом.

У роботі [1] проводилося систематичне вивчення впливу легування хромом на гальваномагнітні, термоелектричні, осциляційні й магнітні властивості шаруватих монокристалів  $Sb_2Te_3$  у температурному інтервалі 1.7-300 К. Визначено анізотропію поверхні Фермі прямими вимірами кутових залежностей екстремальних перетинів поверхні Фермі за допомогою ефекту Шубнікова -Де Газа монокристалів  $(Bi_{0,5}Sb_{0,5})_2Te_3$ .

Сукупність даних про вплив легування галієм, хромом і залізом на термоЕРС, гальваномагнітні властивості й енергетичний спектр необхідна для оптимізації пристроїв і приладів на основі телуридів вісмуту й сурми. Застосування досліджених домішок *Ga*, *Cr*, *Fe* збільшує термоЕРС, а магнітні домішки *Cr*, *Fe*, *Ga* можуть бути використані для створення нових твердотільних приладів з керуванням магнітним полем. Результати досліджень можуть бути покладені в основу розробки перспективної технології одержання матеріалів із заданими властивостями на базі напівпровідників типу телуридів вісмуту й сурми.

У [2] розглянуті підходи до синтезу наноконструкцій на основі нуль-, одно- і двовимірних твердотільних нанореакторів, сформованих порожнинами цеолітів або міжшаровими порожнечами шаруватих сполук.

Наноніти  $Bi_2Te_3$  отримані в матриці пористого оксиду алюмінію [3]. Однак у самому  $Bi_2Te_3$  у результаті кристалізації в міжшарах утворюються частки нанометрового розміру зі зверхстехіометричних атомів [4], також фрактальні структури аналізуються з позицій фізики фрактальних кластерів (ФК). Вони утворюються в процесі росту наноострівців при злипанні твердих часток [5-6]. Вивчення морфології поверхні (0001)  $Bi_2Te_3$  <домішка> і розгляд міжшарових агрегатів зі спостережуваними ансамблями наношарів [6] вимагали внесення ясності по впливу самоорганізованих наночастинок на основі домішок між  $T_e^{(1)} - T_e^{(1)} A^V_2B^{VI}_3$  на термоелектричні властивості.

У зв'язку із цим були потрібні нові експериментальні дані по вивченню морфології поверхні (0001)  $A^V_2B^{VI}_3$  легованих металами (*Zn*, *Se*, *Cr*).

У світлі викладеного можна сформулювати наступну мету: методом рентгендіфрактометрії (РД) і атомно-силової мікроскопії (АСМ) виявити склад утворюваних інтеркаліруваних міжшарових нанофрагментів, при використанні простору  $T_e^{(1)} - T_e^{(1)} A^V_2B^{VI}_3$  у якості нанореактора.

## Експеримент і результати

Сполуку  $Bi_2Te_3$  одержували термічним синтезом при 900-950 К, що звичайно проводили у кварцових ампулах, куди завантажували *Bi*, *Te* і домішки в потрібнім співвідношенні. Після синтезу

сплавів їх занурювали в графітізовані ампули (діаметром – 8мм) заново сплавляли й далі вертикальною спрямованою кристалізацією одержували монокристалічні злитки при градієнті температури  $\Delta T=120$  град/см і швидкості кристалізації 1.4 см/година. У таких кристалах після сколювання уздовж площини (0001)  $Bi_2Te_3$  досліджувалися морфологія домішкових наночастинок. Зі структурної точки зору такі зразки можна розглядати як інтеркаляційні, оскільки в них можна виділити шари матриці-хазіяна й гостя (домішок). Через слабкий хімічний зв'язок між  $T_e^{(1)}$ -  $T_e^{(1)}$  тут характерна зміна морфології міжшарового простору при проникненні атомів металів у нього й утворення напівпровідникових наночастинок.

Інтеркаляцію ж атомів  $Zn$  й  $Cr$  проводили при 600 К. Для цього термічним методом напиляли на очищену поверхню метали уздовж базової площини (0001) на торець зразка. Далі процес інтеркаляції уздовж шарів (0001) проводили при градієнті температури  $\Delta T = 50$  град/см, гарячою стороною була напилена частина зразка. На отриманих таким методом зразках були досліджені свіжосколоти поверхні (0001) і аналізовані електронно-мікроскопічні зображення й рентгендіфрактометричні картини.

### АСМ і РД дослідження

Електронно-мікроскопічні зображення одержували на АСМ марки NC–AFM. РД дослідження проводилися на установці марки Philips Panalytical (X-ray diffractometer). Приготування чистої поверхні шляхом відколу спеціальними інструментами здійснювалося уздовж базисної площини (0001) на повітрі безпосередньо перед проведенням експериментів.

Для всіх легованих зразків крім АСМ-зображень поверхні (0001)  $A^V_2B^{VI}_3$  в 3D масштабі досліджені: АСМ – зображення в 2D масштабі, функції розподілу наночастинок із однаковими розмірами, густина розподілу нанофракталів на поверхні (0001) по висоті.

У монокристалах  $Sb_2Te_3<Cr>$ ,  $Bi_2Te_3<Cr>$ ,  $Bi_2Se_3<Se>$  між шарами  $T_e^{(1)}$ -  $T_e^{(1)}$  отримані наноострівки, що мають нанорозміри (5-20) нм і вважаються наночастиками.

В  $A^V_2B^{VI}_3$  атоми – гості ( $ZnSe$ ,  $Cr$ ) локалізуються у ван-дер-Ваальсовому просторі між телуридними квінтетами. Квінтет складається з п'яти простих шарів. Атоми окремого шару однакові й утворюють плоску гексагональну решітку. Атоми ж кожного наступного шару розташовуються над центрами трикутників, утворених атомами попереднього шару. Атоми  $T_e^{(1)}$ , мають як найближчих сусідів (шість атомів  $Bi$ ) по трьох з кожного прилягаючого шару.  $T_e^{(1)}$ , з однієї сторони пов'язаний із трьома атомами  $Bi$ , а з іншого боку – із трьома атомами  $T_e^{(1)}$ , тобто в решітці є два істотно різних місця для атомів  $Te$  [4].

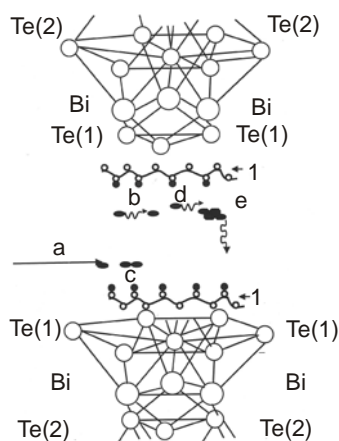


Рис. 1 Схема розміщення атомів вісмуту й телуру в структурі  $Bi_2Te_3$ , наночастинок між  $T_e^{(1)}$  –  $T_e^{(1)}$  модельні представлення при інтеркаляції легкодифундуючих домішок в міжшарі.

На рис. 1 наведена схема розташування атомів у кристалічній ґратці  $Bi_2Te_3$ , шляхи дифузії (відзначено стрілкою (a)) і агрегації часток між телуридними квінтетами (b, e, c), що приводять до формування наночарів (1). Відстань між квінтетами порівняно велика, тобто зв'язок  $T_e^{(1)} - T_e^{(1)}$  дуже слабкий. Найбільш імовірними місцями скупчення й зародження наночасток на основі  $Zn$ ,  $Cr$ ,  $Fe$  можуть бути вакансії з-під  $Te$ , комплекси типу «дислокацій-домішковий атом», границі блоків і зерен, мікротріщини й концентраційні неоднорідності [7-10].

Приведемо експериментальні дані на прикладі систем  $Sb_2Te_3<Cr>$ ,  $Bi_2Te_3<Cr>$ ,  $Bi_2Se_3<Se>$ . АСМ-зображення наночасток, сформованих на поверхні (0001) при інтеркалюванні хромом і при синтезі телуриду вісмуту разом з  $Cr$  з наступною кристалізацією видно з рис. 2-3.

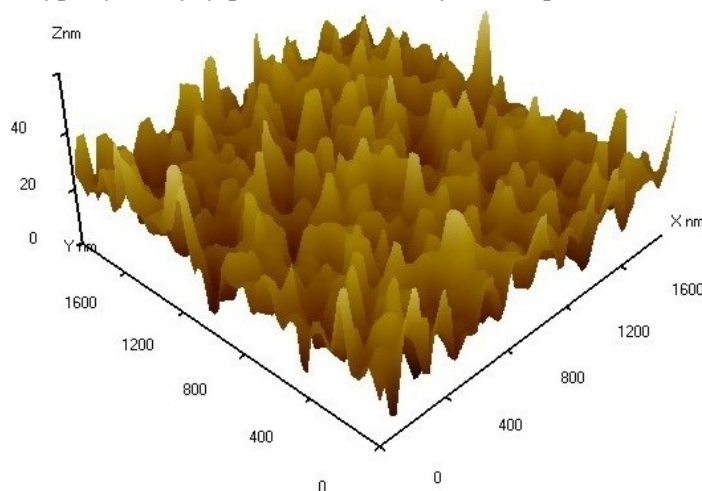


Рис. 2 АСМ-зображення поверхні (0001) телуриду сурми інтеркальованого  $Cr$  в 3D масштабі

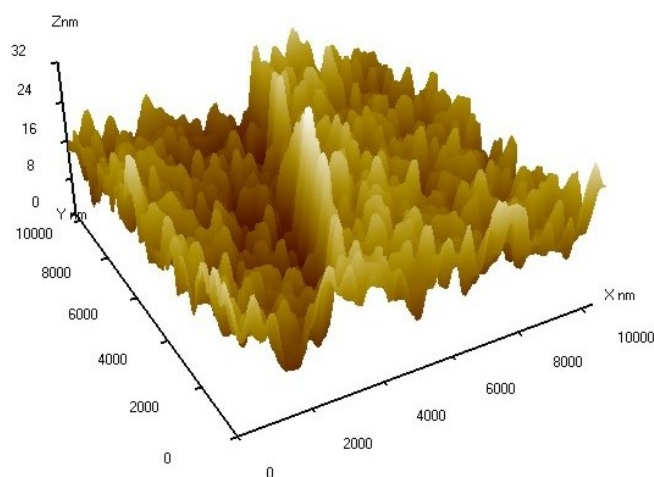


Рис. 3. АСМ-зображення поверхні (0001) інтеркальованого  $Bi_2Te_3<Cr>$  в 3D масштабі

При інтеркалюванні при температурі 600 К хром впроваджується в міжшари, як у нанореакторі взаємодіючи зі зверхстехіометричними компонентами  $Sb_2Te_3$ : телуром і сурмою. Про це свідчать рентгендифракційні піки від наночасток  $CrSb$ ,  $CrTe$ . Рентгендифрактограми

(рис. 4) інтеркальованих зразків  $Sb_2Te_3<Cr>$  (отриманих у процесі вирощування кристалів) показують піки в основному від наночасток  $CrSb$  при  $2\Theta=44^\circ, 52^\circ, 54^\circ$  й  $74^\circ$ , а в  $CrTe$  при  $2\Theta=54^\circ$  і nanoострівці самого  $Sb_2Te_3$ . Тут простір  $T_e^{(1)} - T_e^{(1)}$  відіграє роль не тільки нанореактора, але й роль наноконтейнера для хрому (рис.4).

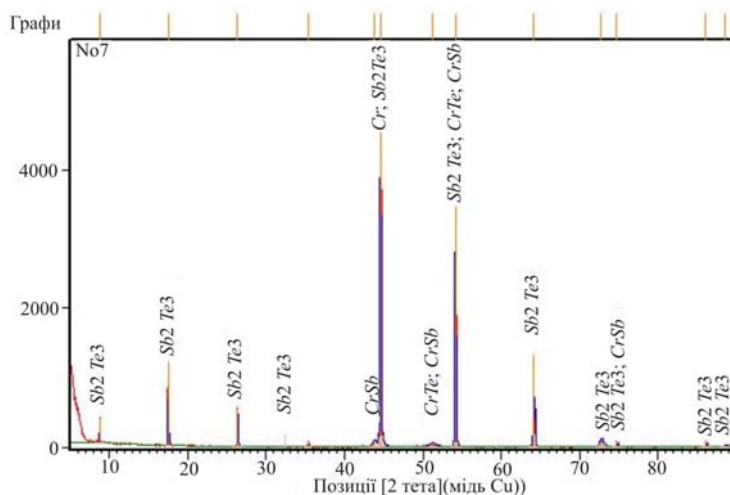


Рис. 4. Рентгендифрактометричний знімок поверхні (0001)

$Sb_2Te_3<Cr>$  легованого  $Cr$

Морфологія поверхні (0001)  $Sb_2Te_3<Cr>$  у тривимірному масштабі (3D) при інтеркалюванні  $Cr$  представлена на рис. 2; nanoострівки тут складаються з  $CrSb$ ,  $CrTe$ . Тут помітні сліди  $Cr$  й  $Sb_2Te_3$ ; висота nanoострівків коливається в межах від 5 до 20 нм. АСМ  $Bi_2Te_3<Cr>$  показує nanoоб'єкти меншого розміру до 15 нм.

РД для  $Bi_2Te_3<Cr>$  дана на рис.5: середовище  $T_e^{(1)} - T_e^{(1)}$  для  $Cr$  тут послужило наноконтейнером: ( $2\Theta=43^\circ, 51^\circ$ ) РД – знімки для  $Bi_2Se_3<Se>$  представлені на рис. 6, а для твердого розчину  $n$ -типу  $<ZnSe>$  на рис. 7; РД піки помітні в основному від  $ZnSe$  при  $2\Theta=45^\circ, 73^\circ$  й  $74^\circ$ . В  $Bi_2Se_3$  ван-дер-Ваальсова щілина відіграє роль не тільки наноконтейнера, але й роль нанореактора.

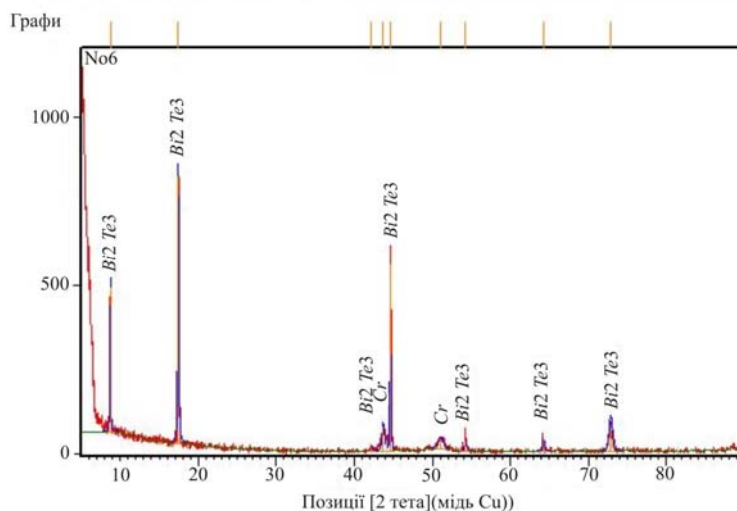


Рис. 5. РД-зображення поверхні (0001)  $Bi_2Te_3<Cr>$  (в 3D масштабі)

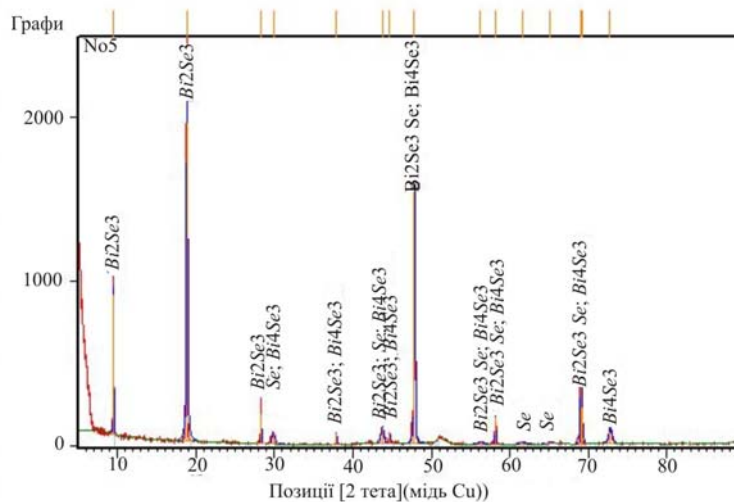


Рис. 6. РД-зображення фрактальних поверхонь в системі  $Bi_2Se_3<Se>$

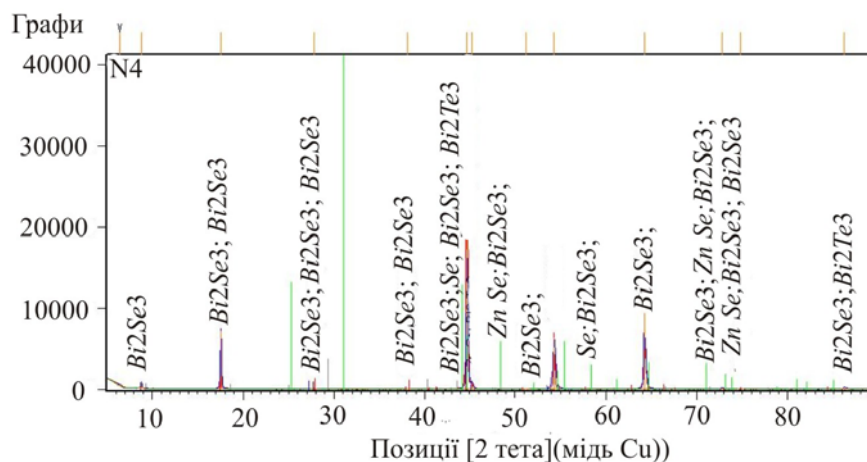


Рис. 7 РД-знімок (0001) в твердому розчині ( $Bi_2Se_3$  4 моль% -  $Bi_2Te_3$  96 моль%)  $<ZnSe>$ .

### Механізм дифузії атомів й їх агрегування

Передбачувані шляхи дифузії часток й їхньої агрегації з подальшим утворенням нанострівок (рис. 1), цілком ймовірно, пов'язані із процесом заповнення домішками місць навколо дислокаційних ям і вакансій з під *Te* на міжшаровій поверхні (0001)  $A_2^V B_3^{VI}$ . Початок формування нано-комірок відбувається в процесі дифузії домішок уздовж базової поверхні (0001) і з їхнім ростом з поверхні на вакансіях *Te* на теллуридних квінтетах. Взаємодіючи між собою й стикаючись один з одним формуються нанострівки на базисній площині (0001), що наочно відбивається на їхній топографії. Процес коагуляції досягає свого піка, при якому нанострівки створюють єдину нанофрактальну поверхню, що складається із хрому, що ми й спостерігаємо на рис. 3 для системи  $Bi_2Te_3<Cr>$ .

Схожі АСМ поверхні між  $T_e^{(1)} - T_e^{(1)} A_2^V B_3^{VI}$  отримані для  $Bi_2Se_3<Se>$  (див. 8), а також для твердого розчину ( $Bi_2Te_3$  96 моль% -  $Bi_2Se_3$  4 моль%)  $<ZnSe>$  (рис. 9).

Майже всі етапи заповнення ван-дер-ваальсової зони пов'язані із процесом швидкого входження легкодифундуючих домішок (*Zn*, *Cr* й *Se*) в  $A_2^V B_3^{VI}$  уздовж базисної площини в результаті напрямків дифузії (напрямок (а) на рис. 1).

Наноострівки фрактального характеру ростуть із зародка на телуридних вакансіях. Роблячи випадкові блукання атоми  $Zn$ ,  $Cr$  рухаються по базисній поверхні (0001) у результаті градиентної дифузії. Стикаючись із зародком первинного острівця, що рухаються прилеглі атоми прилипають до нього. Далі з нової точки в просторі між  $T_e^{(1)} - T_e^{(1)}$  починає рухатися інший атом, роблячи випадкові блукання й знову стикаючись із іншим нанооб'єктом збільшує його розміри.

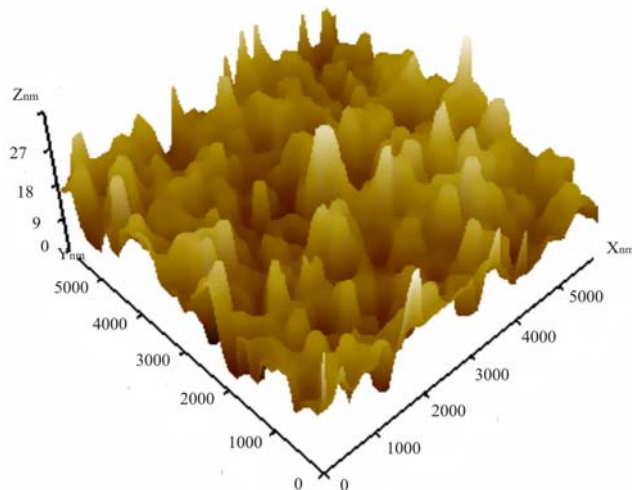


Рис. 8 АСМ-зображення поверхні (0001) в 3D-масштабі  $Bi_2Se_3<Se>$ .

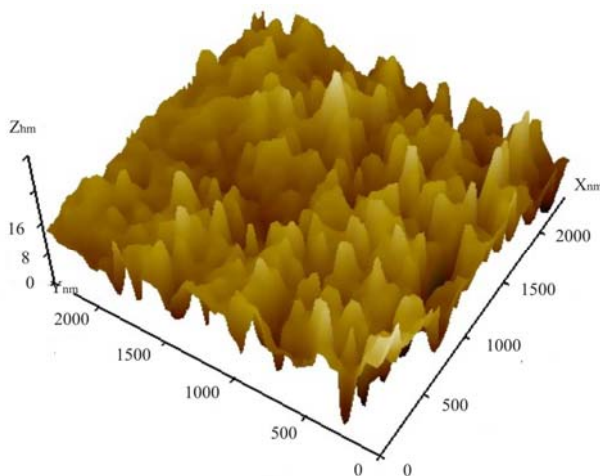


Рис. 9 АСМ- зображення поверхні в 3D – масштабі твердого розчину  $(Bi_2Te_3:96\text{моль}\%-4\text{моль}\%)<ZnSe>$ .

Розмір міжшарового простору  $T_e^{(1)} - T_e^{(1)}$  в  $Bi_2Te_3 \sim 3$  нм, висота ж наночасток коливається в межах 10-20нм. Тут можливий й оборотний стиск або розтягання квінтетів. Відстань  $T_e^{(1)} - T_e^{(1)}$ , можна плавно регулювати, набудовуючи досліджуваний нанореактор на заданий об'єм шляхом наповнення домішками міжшарового простору.

У вивчених системах нанооб'єкти самоорганізувалися й у твердому розчині  $(Bi_2Te_3-Bi_2Se_3)<ZnSe>$  супроводжувалися асоціацією часток близьких розмірів (наприклад:  $Bi_2Se_3$ ,  $Se$ ,  $Bi_2Te_3$  й  $ZnSe$ ) – рис. 9.

По геометричній ознаці – мірності отримані нанооб'єкти мають нанорозміри по всіх трьох напрямках: висота їх не перевищує 15-20нм, ширина й довжина коливаються в межах менших 100 нм; тобто по класифікації [2] дані нанооб'єкти можна віднести до наночасток з

неупорядкованим розподілом. Однак у морфології поверхні (0001) спостерігаються нанострівки менших розмірів  $\sim 5-10$  нм, які можна віднести до кластерів. Нанотворення, як бачимо, становлять частину міжшарових структур в легованих  $A_2^V B_3^{VI}$ . На наш погляд вони впливають на аномальний ефект Холла й феромагнетизм у досліджених нами системах. Розглянемо ті фізичні характеристики  $Sb_2Te_3$ ,  $Bi_2Te_3$  й їхніх твердих розчинів на які сильно впливають атоми хрому.

### Термоелектрична ефективність у твердих розчинах [8]

У твердих розчинах  $p$ -типу на основі халькогенідів вісмуту й сурми  $p-(Bi.Sb)_2 (Te,Se)_3$  проведений аналіз особливостей зміни термоелектричної ефективності ( $Z$ ) з врахуванням даних, отриманих при дослідженні термоелектричних і гальваномагнітних властивостей. Показано, що в зразках з оптимальними концентраціями заряду для інтервалу температур 300-370 К у багатокомпонентній сполуці  $p-Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y$  ( $x=1.3$ ,  $y=0.06$ ) визначається високою рухливістю й низькою ґратковою теплопровідністю. Ріст ефективної маси густини станів і збільшення нахилів температурної залежності рухливості в порівнянні з іншими сполуками приводять до збільшення  $Z$  у твердому розчині  $p-Bi_2Sb_xTe_3$  при  $x=1.6$  в інтервалі температур 370-550 К.

Збільшення термоелектричної ефективності в досліджуваних сполуках визначається також зростанням стиску еліпсоїдів постійної енергії уздовж бінарного й бісекторного напрямків і зміною кута між головними осями еліпсоїдів і кристалографічних осей [8].

### Зменшення власної провідності в $p-Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ пластичною деформацією.

Встановлено ефект зменшення власної провідності в вузькозонному напівпровіднику  $p-Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$  пластичною деформацією. Ефект проявляється в ослабленні зниження коефіцієнта термоЕДС при підвищених температурах, викликаному власною провідністю. Можливі причини ефекту – посилення прозорою орієнтацією кристалічних зерен, утворення наночасток малих розмірів, що приводить до зниження теплопровідності й рухливості переважно міжшарових носіїв заряду.

### Аномальний ефект Холла в $Sb_{2-x}Cr_xTe_3$

Шаруваті напівпровідникові структури з нанострівками характеризуються рядом виявлених у них явищ і властивостей, що представляють інтерес для проведення досліджень і привабливих у термоелементах (TE).

Напівпровідники типу  $Sb_2Te_3$  мають ромбоєдричну структуру (просторова група симетрії  $R 3m -D_{3d}^5$ ) з осями симетрії другого  $C_2$ , і третього  $C_3$  порядків. Кристали  $Sb_2Te_3$  завжди мають  $p$ -типу провідності із -за високої концентрації точкових заряджених дефектів, переважно антиструктурного типу, тобто атоми сурми займають позиції телуру. Причиною формування таких дефектів є слабка полярність зв'язків  $Sb - Te$ . Негативний магнітний опір й аномальний ефект Холла, що спостерігається при температурі рідкого гелію на наш погляд зв'язані з впливом наночасток сформованих у середовищі  $Te^{(1)} - Te^{(1)} A_2^V B_3^{VI}$  (див. рис. 2).

Коефіцієнт Холла у всіх зразках позитивний і росте з ростом вмісту хрому, що вказує на зменшення концентрації дірок. Однак використати його для розрахунку концентрації дірок не



представляється можливим, тому що в телуридах вісмуту й сурми є дві групи дірок з різними концентраціями й рухливостями які не відомі.

Таким чином, бачимо що ван-дер-Ваальсова щілина – це своєрідний нанореактор, де відбувається зародження квазідвовірних шарів з наноострівками між  $Ti^{(1)} - Ti^{(1)}$  на поверхні (0001)  $(Sb_2Te_3) Bi_2Te_3$  <домішка>. Ці структурні порожнечі – нанореактори – заповнюються сполуками, наступна модифікація яких приводить до формування наночастин  $(CrSb)$ . Сформовані порожнинами  $Ti^{(1)} - Ti^{(1)}$  шаруватих кристалів нанореактори, відкривають широкі можливості для дизайну наноконкомпозитів із заданими термоелектричними властивостями.

Вивчення морфології поверхні (0001) $Sb_2Te_3$  і його тверді розчини  $Bi_{1,2}Sb_{4,8}Te_9$  <Te> електронно-мікроскопічними й рентгендифрактометричними методами показало, що у ван-дер-Ваальсовій щілині  $Ti^{(1)} - Ti^{(1)}$  можуть осідати й атоми які не прореагували з іншими елементами (див. рис. 3). Умови формування в міжшарах – нанореакторах приводять до появи наночастин малих розмірів. Однак ці результати вимагають додаткових досліджень, які будуть опубліковані нами в наступних публікаціях.

В [11] наведений аналіз проблем і підходів у їхньому рішенні для напівпровідникових наноструктур із квантовими точками (КК) стосовно й до досліджуваного нами міжшаровим нанооб'єктам, а також представленими нами даними по однорідності наноострівків у їхньому ансамблі на ванн –дер –Ваальсовій поверхні (0001)  $A^V_2B^{VI}_3$  <домішка>. У щільному масиві наноострівків можливе накладення полів пружних деформацій, що приводить до явищ, що викликають зміни електронних властивостей наноструктурованих кристалів. Можна привести ряд проблем, над рішенням яких необхідно продовжити роботи: по-перше в підвищенні однорідності масиву нанооб'єктів (див. рис. 2-3 й 8, 9) по розмірах зі збереженням єдиної форми і їхньої елементної сполуки; по-друге в керуванні просторовим розташуванням (просторово в масиві), з можливістю одержання гранично щільних і вироджених масивів; по-третє в зниженні густини дефектів -протяжних ( дислокації) і точкових дефектів. Особливий інтерес представляють наночастинки малих розмірів ( $\leq 100$  нм), як штучних атомів з невеликим числом зв'язаних станів, що характеризуються величиною енергетичного зазору між дискретними рівнями, що забезпечує роботу приладів при температурах 100 -350 К.

Зрівняємо отримані нами на АСМ- зображення рис.9 з дослідженнями [12] у перколяційному кластері КТ  $ZnSe$  як фрактального об'єкта.

Дуже важливі результати досліджень зразків із квантовими точками  $ZnSe$  із густиною, що відповідає порогу перколяції екситонів і значно перевищуючої його, коли квантові точки утворюють конгломерати [12]. Уперше виявлене випромінювання екситонів з перколяційного кластера зв'язаних квантових точок як фрактального об'єкта. Аналіз структури спектрів фотолюмінесценції зразків показав, що вони визначаються внеском екситонних станів, що перебувають у різних структурних елементах перколяційного кластера, таких як ост (хребет), мертві кінці й внутрішні порожнечі. Створений перколяційний кластер (ПК) зв'язаних часток забезпечує розплив хвильової функції носіїв на макроскопічну відстань. В основі утворення ПК лежить так звана геометрична або квантова перколяція.

Експерименти по провідності зразків дозволяють установити момент появи ПК зв'язаних металевих часток, але з них неможливо одержати інформацію про структуру ПК, тобто про його кістяк, мертві кінці й внутрішні порожнечі. Як відомо, ПК є фрактальним об'єктом, тому не може бути однорідним і суцільним. Отримані АСМ – зображення (рис. 9) можна віднести до ПК отриманого вище порога перколяції. Подальші дослідження будуть необхідні з метою

одержання наноб'єктів на поверхні  $Bi_2Te_3$  з  $ZnSe$  із густиною розподілу нижче порога перколяції.

### Висновки

1. Аналіз морфології поверхні (0001)  $Bi_2Te_3 <Cr, ZnSe>$  показав, що наночастилки формуються між шарами  $T_e^{(1)}$ -  $T_e^{(1)}$  як у нанореакторі, так й у наноконтейнері.
2. Причина швидкого росту нанофрактальних «острівців», очевидно полягає в тому, що  $ZnSe$ ,  $Cr$ , надходять із вакансій у телуридні квінтети.
3. Міжшарові домішки взаємодіють одна з одною з утворенням нанофрагментів з –  $CrSb$ ,  $CrTe$ ,  $ZnSe$ .
4. Таким чином, між квінтетами  $A_2^V B_3^{VI}$  самоорганізувалися наночастилки розмірами 5-10 нм у нанореакторі тільки з  $CrSb$  й  $ZnSe$ , а в системі  $Bi_2Se_3 <Se>$  у міжшарах самоорганізувалися наночастилки з  $Bi_4Se_3$ .

### Література

1. Тарасов П.М. Термоэлектрические, гальваномагнитные и магнитные свойства легированных монокристаллов  $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$  // Автореферат кандидатской диссертации (к.ф.м.н.) Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, Москва, 2009 с.21.
2. Синтез функциональных нанокомпозитов на основе твердофазных нанореакторов, / Ю.Д. Третьяков, А.В. Лукашин, А.А.Елисеев // Успехи химии 73 (9), 2004, с.974-998
3. O.Rabin, P.R. Herz, S.B.Cronin, L.Lin, A.I. Akinwande, M.S.Dresselhaus. // Mater. Res.Soc. Symp.Proc. 637, Д.4.7.1, 2001
4. Некоторые особенности формирования нанобъектов в межслоевом пространстве кристаллов типа  $Bi_2Te_3$ , / К Алескеров, С.Ш. Кахраманов, Е.М. Дерун, [и др.] // Ж. Физика, НАН АР, 2007, том XII, №4, с.41-45).
5. Смирнов Б.М., Физика фрактальных кластеров, / Б.М. Смирнов // Москва, «Наука», 1991, с.134
6. Jens Feder // Fractals, Department of Physics University of Oslo Norway, 1988 Plenum Press, New York, p.250
7. Гасенкова И.В. Исследование структуры монокристаллов твердых растворов на основе теллурида висмута / И.В. Гасенкова, Т.Е. Свечникова // Доклады VIII межгосударственного семинара (2002) – Термоэлектрики и их применения, 145-150.
8. Термоэлектрическая эффективность в твердых растворах р – типа на основе халькогенидов висмута и сурьмы при температурах выше комнатной / Л.Н. Лукьянова, В.А. Кутасов, П.П. Константинов [и др.] // Физика твердого тела, 2010, том 52, вып. 8. с 1492-1497
9. Гольцман Б.М. Подавление собственной проводимости в  $p$ - $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$  пластической деформацией / Б.М. Гольцман, В.А. Кутасов, Л.Н. Лукьянова Физика твердого тела, 2008, том 50, вып. 2, с.227 -228
10. Кульбачинский В.А. Аномальный эффект Холла и ферромагнетизм в новом разбавленном магнитном полупроводнике  $Sb_2 -xCr_xTe_3$  / В.А. Кульбачинский, П. М. Тарасов, // Э. Брюк Письма в ЖЭТФ, 2005, том 81. вып. 7, с.426 - 430

11. Двуреченский А.В. Физические явления и технологии в основе полупроводниковых наноструктур с квантовыми точками для ик –диапазона. / А.В. Двуреченский, А.И. Якимов, // Известия РАН .Серия физическая, 2009, том 73,№1,с.71-75.
12. Бондарь Н.В. Фотолюминесценция и энергия экситонов в перколяционном кластере квантовых точек ZnSe как фрактальном объекте. Н.В.Бондарь, М.С. Бродин. // Физика и техника полупроводников, 2012, том 46, вып.5, с .644 – 648.

Надійшла до редакції 24.01.13