

ФІЗИКА ТА ХІМІЯ ПОВЕРХНІ ТВЕРДОГО ТІЛА

УДК 537.533.73; 539.211; 538.971

П.В. Галій¹, І.Р. Яровець¹, О.Р. Дверій²

Особливості наносистем на основі халькогенідних напівпровідників з природними наноструктурованими матрицями

¹Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів, Україна

²Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, вул. Героїв Майдану, 32, 79012 Львів, Україна

У статті наведено результати досліджень наносистем на основі поверхонь халькогенідних напівпровідників (селенідів індію (In_4Se_3 , InSe) та їх інтеркалатів ($\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$, Ni_xInSe) з природними наноструктурованими матрицями. Вивчено топографію, атомну, електронно-енергетичну структуру. Встановлено механізми формування низькорозмірних пірамідальних індієвих структур на ПС (100) In_4Se_3 . Досліджено особливості формування наносистем: $\text{In}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{Ag}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{Ni}/\text{InSe}(0001)$.

Ключові слова: наносистема, шаруваті кристали, селеніди індію, дифракція повільних електронів, скануючі тунельні мікроскопія та спектроскопія, топографія, атомна структура.

P.V. Galiy¹, I.R. Yarovets¹, O.R. Dveriy²

Features of nanosystems based on chalcogenide semiconductors with natural nanostructured matrices

¹ Electronics and Computer Technology Department, Ivan Franko Lviv National University, 50 Dragomanov Street, Lviv, 79005, Ukraine.

E-mail: galiy@electronics.lnu.edu.ua

² Chair of Electromechanics and Electronics, National Academy of Land Forces, 32 Geroiv Majdanu Street, Lviv, 79012, Ukraine

The aim of the work is study of nanosystems on the base of chalcogenide semiconductors' surfaces (indium selenides (In_4Se_3 , InSe) and their intercalates ($\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$, Ni_xInSe) with natural nanostructured matrices. The topography, atomic and electron-energetic structure were studied. It was found mechanism of formation of low dimensional pyramidal indium structures. It was established features of nanosystems: $\text{In}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{Ag}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{Ni}/\text{InSe}(0001)$.

Keywords: nanosystem, layered crystals, indium selenides, gallium telluride, low energy electron diffraction, scanning tunneling microscopy, scanning tunneling spectroscopy, topography, atomic structure.

Стаття постуила до редакції 14.09.2017; прийнята до друку 25.10.2017.

Вступ

Напівпровідникові шаруваті кристали (ШК) на основі халькогенідних сполук належать до квазі-двовимірних матеріалів, особливості електронних властивостей яких визначаються їх кристалічною будовою, зокрема, електронними взаємодіями в окремому шарі-пакеті як квазінезалежній структурній одиниці.

Напівпровідникові ШК селеніду індію In_4Se_3 завдяки своїм нетривіальним структурним і

анізотропним властивостям, як свідчать результати досліджень багатьма методами щодо структури та топографії їх поверхонь сколювання (ПС), мають структурну стабільність і низькорозмірні 1D і 2D природні наноструктури. Вказане робить їх перспективним матеріалом для використання як матриць/шаблонів для формування поверхневих низькорозмірних наногетеросистем, провідних квантових наноточок, нанодротів, нанощурів. Для цього необхідні як подальші дослідження структури поверхонь

селенідів індію та їх особливих властивостей, так і перші кроки щодо апробації методів отримання низькорозмірних наногетеросистем на їх ПС.

Низькорозмірні квантові структури представляють практичну цінність для реалізації у приладах наноелектроніки. Вони розміщуються і реалізуються на певних підкладках чи наноструктурованих матрицях, як це можливо у випадку ПС $\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{InSe}(0001)$ і мають контакти з іншими структурами і функціональними елементами – тобто разом з іншими утворюють наносистеми, як приклад, це – $\text{In}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{Ag}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{Ni}/\text{InSe}(0001)$.

Реалізація наносистем $\text{In}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{Ag}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{Ni}/\text{InSe}(0001)$ можлива як методом напилення індію на ПС(100) In_4Se_3 , так і сколюванням *in situ* попередньо інтеркальованого сріблом або нікелем селеніду індію. При цьому металічні наноструктури, які формуються у процесі інтеркалювання в об'ємі ШК $\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$ або Ni_xInSe у міжшарових щілинах, “виходять” на ПС.

Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених вивченню властивостей інтеркалатів (Ni_xInSe , $\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$), в літературі немає даних щодо кристалографії, топографії, атомної та електронно-енергетичної структури поверхонь сколювання інтеркалатів, що є важливим для одержання наногетеросистем на їх ПС. Актуальність таких досліджень зумовлена потребою одержання напівпровідникових кристалів з металевими “включеннями” як в об'ємі, так і на поверхні, з метою створення на їх основі нових фотодетекторів, магнітних сенсорів чи пристроїв спінтроники.

Мета роботи полягає у отриманні, дослідженні та встановленні особливостей наносистем $\text{In}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{Ag}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$, $\text{Ni}/\text{InSe}(0001)$ на основі халькогенідних напівпровідників з природними наноструктурованими матрицями (In_4Se_3 , InSe).

I. Методи дослідження

Монокристали телуриду галію (GaTe) та селенідів індію інтеркальованих нікелем (інтеркалати Ni_xInSe) були вирощені методом Бріджмена-Стокбаргера. Монокристали чистого In_4Se_3 та спеціально інтеркальованого сріблом селеніду індію $\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$ – Кіропулоса-Чохральського. Для експериментальних досліджень ПС кристалів використані такі методи: дифракція повільних електронів (ДПЕ) на відбивання, скануюча тунельна мікроскопія (СТМ) – дослідження атомної, мікро- і наноструктури поверхонь, формування кластерів та нових фаз; Оже-електронна спектроскопія (ОЕС) – для дослідження елементно-фазового складу та появи нових електронних взаємодій на поверхнях; скануюча тунельна спектроскопія (СТС) – для дослідження густини станів та електронно-енергетичної структури ПС.

Наногетеросистеми $\text{Ni}/\text{InSe}(0001)$ та $\text{Ag}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$ отримали методом сколювання гібридних інтеркалатних шаруватих системи Ni_xInSe [1-2] та $\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$ вздовж міжшарових щілин.

Наногетеросистему $\text{In}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$ отримали шляхом напилення індію на ПС (100) In_4Se_3 .

II. Результати та їх обговорення

Особливості наносистеми $\text{Ni}/\text{InSe}(0001)$ і мікро- та наноструктура міжшарових поверхонь сколювання телуриду галію

Отримано наногетеросистему $\text{Ni}/\text{InSe}(0001)$ методом сколювання гібридної інтеркалатної шаруватої системи Ni_xInSe вздовж міжшарових щілин та встановлено, що нікель, який міститься у міжшарових щілинах інтеркалатів Ni_xInSe ($x=0; 0,5; 0,75; 1,0; 2,0$ ат.%) і, відповідно, на міжшарових ПС (0001) інтеркалатів Ni_xInSe не взаємодіє зі селеном, індієм, немає взаємодії з киснем і вуглецем [1-2]. Нікель, який міститься у міжшарових щілинах інтеркалатів Ni_xInSe являє собою, переважно, дрібнодисперсну фазу металевих кластерів [1-9]. Розрахована максимальна концентрація нікелю на ПС (0001) інтеркалатів Ni_xInSe у кількості до 7,67 ат.%, яку спостерігають при 0,75 ат.% нікелю у вихідному сплаві [1-2].

Встановлена структурна і температурна стабільність міжшарових ПС (0001) інтеркалатів Ni_xInSe та підтверджена можливість використання гібридної структури (інтеркалатної системи Ni_xInSe) у приладних застосуваннях, зокрема, у магнітоелектроніці та спінтрониці [1-9].

Встановлено, за результатами комплексного дослідження методами СТМ/СТС і ДПЕ ПС кристалів GaTe , існування двох різних структур на ПС GaTe : гексагональної у макромасштабі і моноклінної, яка є випадковим чином розподілена на поверхні у наномасштабі [10-12]. Відповідно до отриманих результатів [10-12], встановлено, що поверхня GaTe не є плоскою і характеризується наявністю добре розвиненої сходинчастої структури, яка отримується внаслідок сколювання кристалу. Виявлена можливість локальної у наномасштабі реконструкції базової гексагональної структури в моноклінну, що пов'язана із кількістю поверхневих дефектів, таких як довільно розміщені сходинки з висотою, яка дорівнює товщині одного пакету Te-Ga-Ga-Te [10-12]. Це свідчить, що ПС ШК GaTe є непридатними як підкладки для формування наногетеросистем на їх основі.

Топографія та атомна структура поверхонь сколювання (100) кристалів In_4Se_3

Одержані СТМ-топограми вказують на існування періодичної, гофрованої структури на ПС (100) In_4Se_3 [13]. Одержані, вздовж основних напрямів, періодичні профілі співпадають зі сталими поверхневої ґратки вздовж відповідних напрямків ($c(x)$, $b(y)$), що вказує на те, що після сколювання поверхня (100) In_4Se_3 не перебудовується і є мікроструктурно стабільною [13].

За картинами ДПЕ, встановлено, що симетрія оберненої ґратки і відношення значень сталих c^*/b^* двовимірних обернених ґраток (відповідно векторів b/c прямих ґраток) ПС (100) In_4Se_3 не залежить від часу експозиції при 295 К після сколювання у надвисокому вакуумі (НВВ), і вказує на те, що у цьому разі ґратка не перебудовується і ПС (100) In_4Se_3 є структурно стабільними [13-15].

Встановлена, за картинами ДПЕ, анізотропія лінійного розширення ПС (100) In_4Se_3 за напрямками векторів сталих ґратки b та c : температурний коефіцієнт розширення за напрямком вектора сталої ґратки c є більшим, ніж температурний коефіцієнт розширення за напрямком вектора сталої ґратки b . Одночасно, відсутність зміни симетрії ДПЕ-картин, отриманих у широкому температурному діапазоні 77–295 К, засвідчує температурну стабільність ПС (100) In_4Se_3 [13-16].

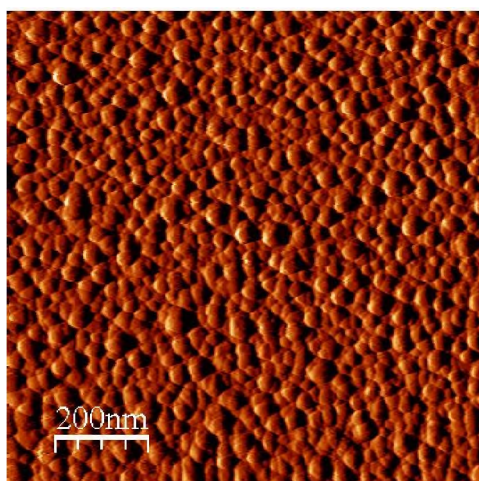
Обчислено, виходячи з отриманих експериментальних результатів зміни інтенсивності дифракційно-інтерференційних рефлексів, у діапазоні температур зразка 77-295 К, температуру Дебая та фактор Дебая-Уоллера для ПС (100) In_4Se_3 і встановлено, що вона відрізняється від температури для об'єму ШК In_4Se_3 , що може бути обумовлено існуванням особливих нелінійних згинних коливань шару-пакету, як окремої структурної одиниці ШК In_4Se_3 та зміни симетрії взаємодії атомів на поверхні порівняно з об'ємом [14-15].

Все вищевикладене засвідчує, що ПС (100) орторомбічних ШК In_4Se_3 є **придатними** для використання як матриці/шаблони для формування наногетеросистем на їх основі.

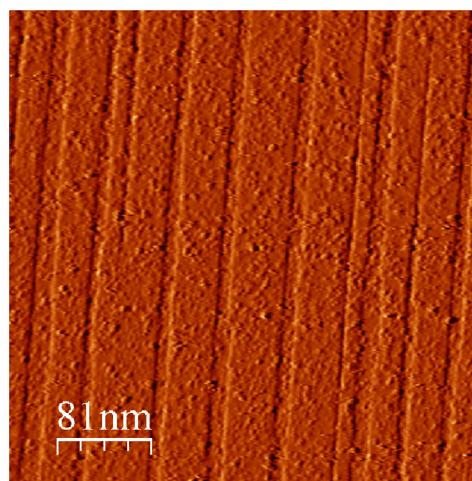
Металеві наносистеми на поверхнях сколювання кристалів селенідів індію

Досліджено топографію, морфологію та електронно-енергетичну структури методами СТМ та СТС, відповідно, срібних і напилених індієвих наноструктур на ПС (100) In_4Se_3 . Також вивчався елементно-фазовий склад ПС $\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$ методом ОЕС. Індієві наносистеми отримували методом напилення індію на ПС (100) In_4Se_3 , срібні наноструктури та наносистеми утворювали сколюванням *in situ* попередньо інтеркальованого сріблом ШК $\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$, при цьому металічні наноструктури, які формуються у процесі інтеркалювання в об'ємі ШК $\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$ у міжшарових щілинах, “виходять” на ПС (100).

Отримано індієві гетеронаносистеми $\text{In}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$ на наноструктурованій ПС (100) ШК In_4Se_3 . Встановлено, що формування низькорозмірних пірамідальних індієвих структур відбувається за механізмом Фольмера–Вебера аж до моменту утворення наноточками індію неоднорідної плівки, подальший ріст якої відбувається за механізмом Странського–Крастанова [17]. Також встановлено, що наноточки переважно формуються на ПС (100) In_4Se_3 з низькою електропровідністю (рис. 1 а), а квазіодномірні структури – на поверхнях ШК з високою провідністю (рис. 1 б). Контроль об'ємної провідності кристалу In_4Se_3 , наноструктурована ПС (100) якого слугує підкладкою, є першим кроком до керування розмірністю індієвих наноструктур на початковій стадії їх росту.



а



б

Рис. 1. СТМ-зображення НВВ сколів (100) (напруга зміщення 1,6-1,7 В, тунельний струм $\cong 100$ пА) кристалів In_4Se_3 з низькою ($\cong 0,01-0,05$ Ом·см⁻¹) (а) і високою ($\cong 10-10^2$ Ом·см⁻¹) (б) провідністю після 480 с осадження Іп.

Наявність на ПС (100) In_4Se_3 самоінтеркалюючої надстехіометричної домішки індію разом з наноструктурованою борознистою матрицею визначає динаміку трансформації наноб'єктів: наноточки \rightarrow наношнур \rightarrow суцільні наноплівки на ПС (100) In_4Se_3 . Енергетично вигідною формою острівців є піраміди, які спостерігали в нашому ви-

падку (рис. 2) і які, як свідчать дані СТС (рис. 2 г, д), сформовані з індію.

Орієнтовані зародки виникають відповідно до розташування на ПС потенціальних ям і активаційних рядів з іонів індію In^+ (рис. 3 а) у яких з мінімумом енергії розташовуються атоми індію In , що осаджуються, і внаслідок цього спостерігали орієнтаційний ріст низькорозмірних наноструктур індію та індієвих

наносистем на кристалічних шарах-пакетах ПС (100) In_4Se_3 (рис. 3 б).

Кластери індію, які наявні на початкових поверхнях (100) In_4Se_3 , з концентраціями, що залежать від умов вирощування кристалу і які розміщені в певних місцях структури поверхні [17, 18], виступають як центри зародку

формування нової кристалічної фази індію, що формується на сколах в процесі наплення індію.

Орієнтаційний вплив підкладки на ріст гетеронаносистем 0D та 1D індію визначається не стільки силовими, скільки структурно-геометричними особливостями атомно шорстких ПС (100) In_4Se_3 .

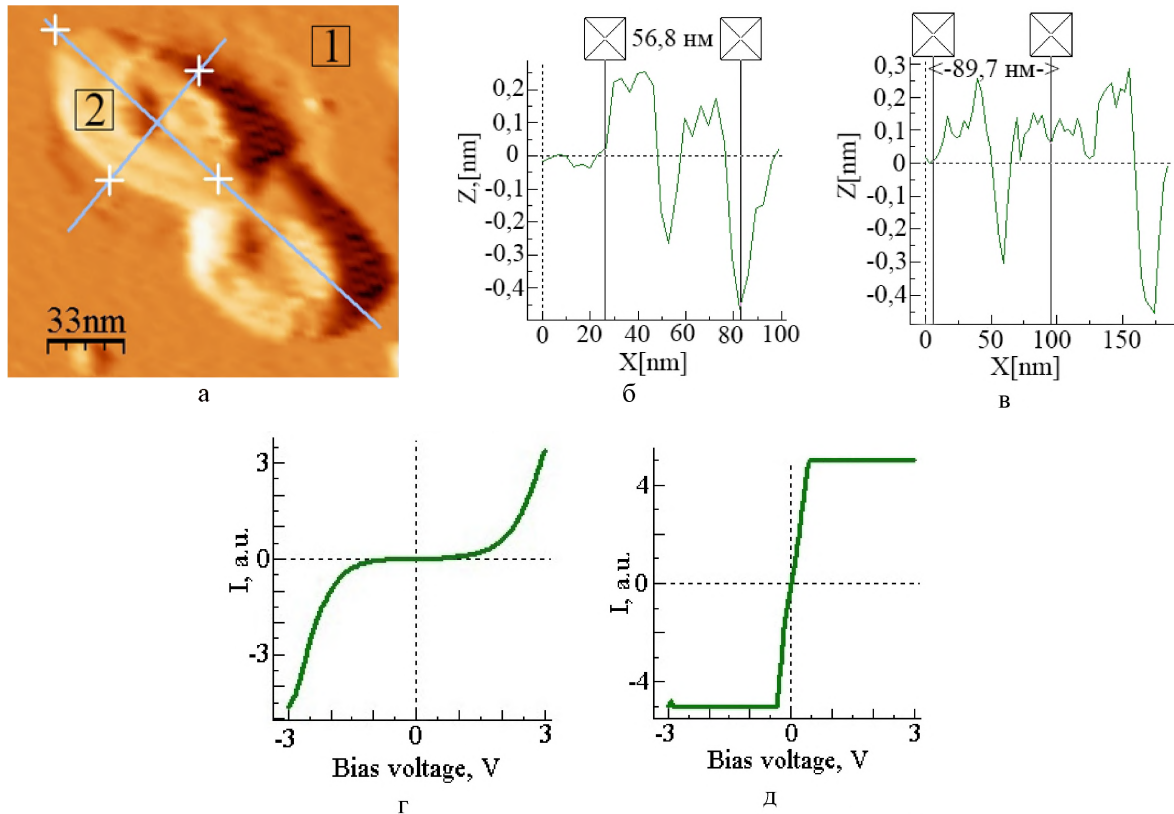


Рис. 2. СТМ зображення збільшеного фрагменту поверхні розміром $147,5 \times 165 \text{ nm}^2$ (а), що отримане при напрузі зміщення $-1,2 \text{ В}$ та струмі тунелювання 84 пА , та відповідні топографічні профілі поперек (б) та вздовж (в) індієвої наноструктури пірамідальної форми, отриманої напленням протягом 25 с . СТС дослідження ділянок поверхні 1 та 2 розміром $16 \times 16 \text{ nm}^2$, що представлені типовими ВАХ $I(V)$, які характерні для напівпровідника (г) – ділянка 1; для металу (д) – ділянка 2.

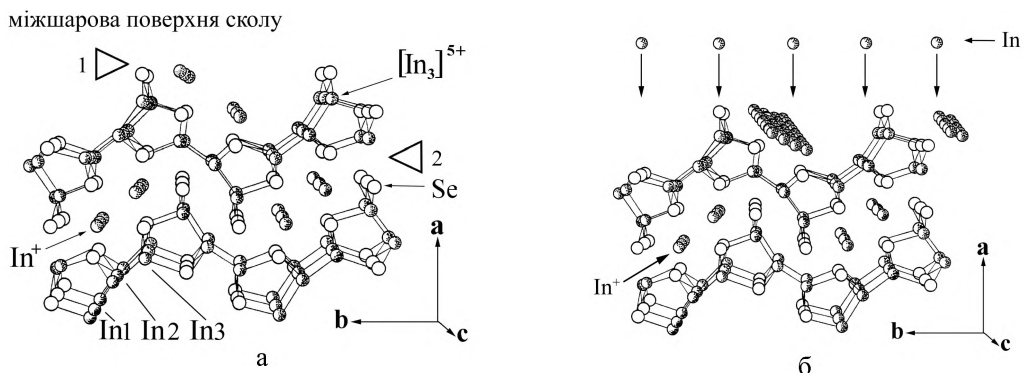


Рис. 3. Модельне зображення росту індієвих нанорозмірних структур на кластерах індію, що присутні на ПС (100) In_4Se_3 : а) Фрагменти міжшарових ПС (100) In_4Se_3 відповідно до структури кристалу (проекція на площину (001)), з якого видно, які атоми “виходять” на поверхню. Трикутники на рисунку вказують напрям сколювання та номер сколу; б) Активаційний ріст на ПС (100) In_4Se_3 у випадку сколу 2.

Вперше отримані наногетеросистеми $\text{Ag}/\text{In}_4\text{Se}_3(100)$ методом сколювання у НВВ, інтеркалатної шаруватої системи $\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$ вздовж міжшарових щілини, з почерговими напівпровідниковими шарами-пакетами In_4Se_3 та металевими

Ag шарами [19, 20]. За результатами СТМ/СТС встановлена відсутність реконструкції ПС (100) спеціально інтеркальованих сріблом ШК $\text{Ag}_x\text{In}_4\text{Se}_3$, які показують добру відповідність параметрів поверхневої і об'ємної ґраток, та неоднорідний розподіл інтер-

каляту у наномасштабі (дрібнодисперсні кластери срібла) на ПС (100) ШК $Ag_xIn_4Se_3$.

Встановлено, що поряд із наявністю локалізованих станів на ПС (100) In_4Se_3 , зумовлених самоінтеркалятом індію, які характерні для спеціально неінтеркальованих кристалів, спостерігали стани, обумовлені сріблом, введеним у міжшарову щільну в процесі інтеркаляції. Крім того, СТС-спектри однозначно дають підстави зробити висновок про існування на ПС різних локальних ділянок, які виявляють або напівпровідникові, або суто металічні властивості [19, 20].

Висновки

1. Отримано наносистему Ni/InSe (0001) і встановлено, що нікель, який міститься у міжшарових щільних інтеркалатів Ni_xInSe ($x=0; 0,5; 0,75; 1,0; 2,0$ ат.%) і, відповідно, на міжшарових ПС (0001) під час сколювання не взаємодіє зі селеном, індієм, а також з киснем і вуглецем. Максимальна концентрація нікелю на ПС (0001) інтеркалатів Ni_xInSe , яку спостерігали при 0,75 ат.% нікелю у вихідному сплаві, становить 7,67 ат.%.

2. Встановлена структурна і температурна стабільність міжшарових ПС (0001) інтеркалатів Ni_xInSe . Нікель, що міститься у міжшарових щільних інтеркалатів Ni_xInSe і відповідно на їх ПС (0001), являє собою, переважно, дрібнодисперсну фазу металевих кластерів. Підтверджена можливість використання гібридної інтеркалатної системи Ni_xInSe у магнітоелектроніці.

3. Встановлено наявність на ПС кристалів GaTe різних фаз: гексагональної у макромасштабі і моноклінної на локальному рівні. Експериментально з'ясовано, що поверхні кристалів GaTe зазнають реконструкції, так як після сколювання відбувається перебудова із базової гексагональної структури у моноклінну на нанорівні, і тому ПС ШК GaTe є непридатними як підкладки для формування індієвих гетеронаносистем In/GaTe з використанням їх ПС.

4. Встановлена анізотропія температурного розширення ПС (100) In_4Se_3 за напрямками векторів сталих ґратки b та c : температурний коефіцієнт розширення за напрямком вектора сталої ґратки c є більшим, ніж температурний коефіцієнт розширення за напрямком вектора сталої ґратки b , але водночас, немає зміни симетрії ДПЕ-картин, отриманих у температурному діапазоні 77–295 К. Це доводить температурну стабільність ПС (100) In_4Se_3 . Розраховані значення сталих двовимірної ґратки, що

лежить у площині ПС (100) орторомбічних ШК In_4Se_3 , отримані за картинами ДПЕ, збігаються з результатами, отриманими методами АСМ і СТМ та перебувають у межах похибки вказаних методик, задовільно збігаючись зі значеннями одержаними методом X -дифрактометрії.

5. Розраховано фактор Дебая–Уоллера і температуру Дебая для ПС (100) In_4Se_3 та встановлено, що вона відрізняється від температури Дебая для об'єму ШК In_4Se_3 , що може бути обумовлено наявністю особливих нелінійних згинних коливань шару-пакету, як окремої структурної одиниці ШК In_4Se_3 та зміни симетрії взаємодій атомів на поверхні, порівняно з об'ємом. Зроблено висновок, що наноструктуровані, борознисті й анізотропні ПС (100) In_4Se_3 придатні для використання як матриці/шаблони для одержання поверхневих низькорозмірних наносистем – наноточок, нанодротів та інших впорядкованих наноструктур.

6. Уперше отримано індієві гетеронаносистеми In/In₄Se₃(100) на наноструктурованій ПС (100) ШК In_4Se_3 . Встановлено, що формування низькорозмірних пірамідальних індієвих наноструктур відбувається за механізмом Фольмера–Вебера аж до моменту утворення наноточками індію неоднорідної плівки, подальший ріст якої відбувається за механізмом Странського–Крастанова. Також встановлено, що наноточки переважно формуються на ПС (100) In_4Se_3 з низькою електропровідністю, а квазіоднорідні структури – на поверхнях ШК з високою провідністю. Контроль об'ємної провідності кристалу In_4Se_3 , наноструктурована ПС (100) якого слугує підкладкою, є першим кроком до керування розмірністю індієвих наноструктур на початковій стадії їх росту.

7. Вперше отримані наносистеми $Ag/In_4Se_3(100)$ і встановлена відсутність реконструкції ПС (100) спеціально інтеркальованих сріблом ШК $Ag_xIn_4Se_3$ та неоднорідний розподіл інтеркаляту в наномасштабі (дрібнодисперсні кластери срібла) на ПС (100) ШК $Ag_xIn_4Se_3$.

8. Встановлені особливості формування досліджуваних наносистем, які полягають у тому, що методом сколювання інтеркалатних систем ШК Ni_xInSe та $Ag_xIn_4Se_3$ отримуються несутільні, нанодисперсні фази інтеркаляту на ПС. Лише методом напилення індію на ПС (100) ШК In_4Se_3 вдалося отримати впорядковані гетеронаносистеми In/In₄Se₃(100) на ПС – наноточки та нанощури.

Література

1. П.В. Галій, П. Мазур, А. Ціжєвський, І. Р. Яровець, Т. М. Ненчук, Франк Сімон, Я.М. Бужук, В. Л. Фоменко, Журн. нано- та електрон. фіз., 8(1), 01012-1 (2016).
2. П. В. Галій, І. Р. Яровець, Франк Сімон, Я. М. Бужук, В. Л. Фоменко, Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія Хімія, Випуск XIX, 32 (2015).
3. P. V. Galiy, T. M. Nenchuk, A. Ciszewski, P. Mazur, I. R. Yarovets', 7th International Workshop on Surface Physics. Molecular Nanostructures, (Trzebnica (Poland), 2015), P. 54.
4. I. R. Yarovets', ICSSOS (International Conference on the Structure of Surfaces) Workshop-3 on surface structure: Electron Diffraction for Quantitative Surface Structure Determination, (Lodz (Poland), 2015), P. 12.
5. P. V. Galiy, Yaroslav B. Losovyj, T. M. Nenchuk, A. Ciszewski, P. Mazur, I. R. Yarovets', The XXth International Seminar on Physics and Chemistry of Solids, (Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, 2015), P. 49.

6. І. Р. Яровець, Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників “Лашкарівські читання-2016” з міжнародною участю, (Київ, 2016), С. 39.
7. P. V. Galiy, P. Mazur, A. Ciszewski, I. R. Yarovets', T. M. Nenchuk, F. Simon, Ya. B. Losovyj, Ya.M. Buzhuk, International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (Nano-2016), (Eurosvit, Lviv, 2016), P. 314.
8. P. V. Galiy, T. M. Nenchuk, P. Mazur, O. P. Poplavskyy, I. R. Yarovets', O. R. Dveriy, Ya.M. Buzhuk, XVI International Conference Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems, (Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, 2017), P. 215.
9. P. V. Galiy, P. Mazur, A. Ciszewski, T. M. Nenchuk, I. R. Yarovets', O. R. Dveriy, Ya. M. Buzhuk, International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (Nano-2017), (SME Burlaka, Kiev, 2017), P. 713.
10. P. Galiy, T. Nenchuk, A. Ciszewski, P. Mazur, S. Zuber, and I. Yarovets', *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 37(6), 789(2015).
11. І. Р. Яровець, Т. М. Ненчук, III Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених та студентів “Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи”, (РВВ Луцького НТУ, Луцьк, 2014), С. 262.
12. P. V. Galiy, T. M. Nenchuk, P. Mazur, O. P. Poplavskyy, I. R. Yarovets', The XV International Conference Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems, (Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, 2015), P. 350.
13. П. В. Галій, Т. М. Ненчук, І. Р. Яровець, *Журн. нано- та електрон. фіз.*, 6(2), 02029-1 (2014).
14. П. В. Галій, Я. Б. Лозовий, Т. М. Ненчук, І. Р. Яровець, *Укр. фіз. журн.*, 59(6), 613(2014).
15. P. V. Galiy, T. M. Nenchuk, I. R. Yarovets', Ya. B. Losovyj, 6th International Workshop on Surface Physics. Functional Materials, (Niemcza (Poland), 2013), P. 51.
16. І. Р. Яровець, Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників “Лашкарівські читання-2014” з міжнародною участю, (ВП “ЕДЕЛЬВЕЙС”, Київ, 2014), С. 45.
17. P. V. Galiy, T. M. Nenchuk, P. Mazur, A. Ciszewski, I. R. Yarovets', International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (Nano-2016), (Eurosvit, Lviv, 2016), P. 313.
18. P. V. Galiy, P. Mazur, A. Ciszewski, T. M. Nenchuk, I. R. Yarovets', International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (Nano-2017), (SME Burlaka, Kiev, 2017), P. 712.
19. П. В. Галій, Т. М. Ненчук, А. Ціжевський, П. Мазур, Я. М. Бужук, І. Р. Яровець, *Металлофізика и новейшие технологии*, 35(8), 1031(2013).
20. P. V. Galiy, T. M. Nenchuk, P. Mazur, O. P. Poplavskyy, Ya. M. Buzhuk, I. R. Yarovets', The XIV International Conference Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems, (Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, 2013), P. 213.

Галій Павло Васильович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри сенсорної та напівпровідникової електроніки.

Яровець Ігор Романович – молодший науковий співробітник кафедри сенсорної та напівпровідникової електроніки.

Дверій Остап Романович – викладач кафедри електромеханіки та електроніки.