

С. Ковачов, І. Богданов, І. Бардус, Д. Дрожча, К. Тиховод, А. Хрекін,
В. Бондаренко, І. Косошов, Я. Сичікова

Про механізм синтезу періодичних оксидних нанокристалітів на поверхні монокристалічного InP

Бердянський державний педагогічний університет, Бердянськ, Україна, yanasuchikova@gmail.com

Нами було отримано унікальні періодичні оксидні нанокристаліти на поверхні фосфіду індію. У статті досліджуються морфологічні характеристики одержаних структур та компонентний склад. Основна увага в статті зосереджена на поясненні механізму формування періодичних структур, які упаковані по типу «паркет». Запропоновано механізм, який ґрунтується на ковзанні джерел дислокаційних петель прямокутної форми. Розглянуто систему головної та вторинних (набігаючих) дислокацій, які спричиняють появу сходинок. Також запропоновано математичну інтерпретацію описаної моделі.

Ключові слова: фосфід індію, періодичні структури, дислокації, електрохімічне травлення, поруватий оксид.

Подано до редакції 29.10.2022; прийнято до друку 6.03.2023.

Вступ

Потреба у нових «розумних» матеріалах зумовлена зростаючим попитом на високотехнологічну електроніку [1, 2]. Композитні матеріали знайшли широке використання у приладах фотоніки [3, 4]. Гетероструктури широко використовуються як матеріали для лазерів [5, 6]. Планарні наноструктури представляють значний інтерес для тонкоплівкових технологій, зокрема для створення світлодіодів [7, 8]. Останнім часом увага дослідників зосереджується на матеріалах з розвинутою архітектурою поверхні [9, 10]. Сьогодні успішно синтезують наноголки [11], нановіскери [12], структури подібні квітам [13], поруваті поверхні [14, 15] тощо. Крім того, набувають значної популярності періодичні структури [16, 17]. Перевага таких структур над іншими видами наноструктурованих наноматеріалів зумовлюється можливістю контролювати довжини хвиль, кути випромінювання тощо [18, 19].

Розуміння цих трендів ставить перед науковцями дві задачі: (1) підбір ефективних недорогих методів синтезу, що дозволяють створювати періодичні

наноструктури із керованими властивостями [20, 21]; (2) підбір компонентів системи підкладки/наноструктура з добре узгодженими параметрами [22].

Сьогодні активно досліджуються методи синтезу оксидних напівпровідників та інтеграція їх на підкладки [23 – 25]. Так, популярними об'єктами досліджень є Ga₂O₃ [26, 27], In₂O₃ [28], ZnO [29], CdO [30], TiO₂ [31] тощо. Такі напівпровідники демонструють чудову здатність до наноструктурування, є хімічно і термічно стабільними [32, 33]. Крім того, оксидні плівки на поверхні напівпровідника проявляють пасивуючі властивості та дозволяють продовжувати строки служби приладів [34, 35]. Єдиною проблемою при формуванні таких гетероструктур є, як правило, невідповідність кристалічних ґраток, що спричинює появу великої кількості напружених станів на межі розділу двох компонентів гетероструктури [36]. З іншого боку, така ситуація може ефективно використовуватися при формуванні структур з нестандартною морфологією [37, 38]. У цьому випадку дефекти вихідного напівпровідника (підкладки) є джерелами зародження наноструктури на поверхні [39]. Ефективне

використання цього явища є доволі складною задачею та потребує детального вивчення.

У цій роботі ми повідомляємо про синтез періодичних структур на поверхні фосфіду індію, які упаковані по типу паркет. Такі структури є перспективними для вивчення так як періодичність може ефективно використовуватися для створення фотокаталітичних гетероструктур та хвилеводів. Ми даємо якісну та кількісну інтерпретацію механізму утворення оксидної паркетної структури на поверхні високолегованого фосфіду індію.

I. Експеримент

Періодичні паркетні структури формували комбінованими хімічними методами травлення. Було використано стандартну електрохімічну комірку, виконану з тefлону. Комірка заповнювалася електролітом. Після цього починали процеси травлення з послідовним осадженням продуктів реакції на поверхню зразка. Перший етап проводили у режимі електрохімічного анодування при постійній густині струму. На другому етапі використовували просте електрохімічне травлення без дії струму. Розчин електроліту протягом обох етапів не міняли. У таблиці 1 наведено умови хімічної обробки зразків.

Перед експериментом зразки очищували промиванням в розчині оцту, потім знежирювали за допомогою етилового спирту. Відразу після цього розпочинали експеримент. Після припинення експерименту зразки висушували та зберігали на відкритому повітрі.

Дослідження поверхневої морфології виконували на мікроскопі Jeol (Японія), оснащеним спектрометром NCA Energy 350 виробництва Oxford Instruments Analytical (Великобританія). Методом растрової електронної мікроскопії з використанням сигналів вторинних електронів (SEI) було отримано топографічні зображення поверхні синтезованих наноструктур. Дані щодо неоднорідності та складу поверхні було отримано в режимі обернено розсіяних електронів (BEC). Енергія пучка електронів була вибрана в діапазоні (10-15) кеВ. Визначення елементного складу зразків виконували за допомогою енергодисперсійного спектрометру при прискорюючій напрузі (15-20) кВ і струмі пучка (1-3) нА. Кількісний аналіз хімічного складу поверхні зразка виконували шляхом порівняння характеристичних ліній зразка та стандартів.

II. Результати

Рис. 1 демонструє SEM-зображення поверхні InP після електрохімічної обробки. Можна бачити, що на поверхні було сформовано масивні кристалічні нанодрти, які розташовані по типу паркет. У таблиці 2 наведено геометричні розміри утворених структур.

Таким чином, можна бачити, що нанодрти мають форму правильної призми. Цікаво відмітити, що дроти мають пористу структуру з розміром пор 80-120 нм.

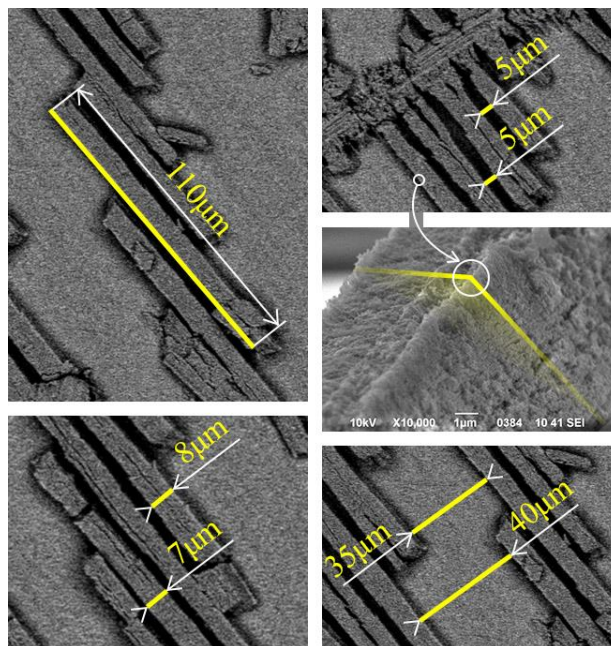


Рис. 1. SEM-зображення утвореної періодичної структури на поверхні InP.

Таблиця 2.

Геометричні розміри нанодротів

| Характеристика | Розмір, мкм |
|----------------------------------|-------------|
| Товщина нанодрота | 8–10 |
| Висота нанодрота | 7–10 |
| Довжина нанодрота | 110–130 |
| Відстань між сусідніми дротами | 3 |
| Відстань між «паркетними шарами» | 20–50 |

На рис. 2 наведено результати EDX аналізу поверхні утвореної структури в точці на поверхні кристаліту. Можемо бачити, що кристаліти утворені оксидом індію з невеликим вмістом фосфору. Це певним чином свідчить про механізм утворення періодичних нанокристалітів на поверхні фосфіду

Таблиця 1.

Умови експерименту

| Етапи | Електроліт | Щільність струму, j, mA/cm ² | Час, хв | Додаткові умови |
|--------|--|---|---------|--|
| 1 етап | HF:H ₂ O:C ₂ H ₅ OH=1:1:2 | 150 | 10 | Перемішування електроліту, у якості катоду використовували платину |
| 2 етап | HF:H ₂ O:C ₂ H ₅ OH=1:1:2 | 0 | 10 | Кімнатна температура, темрява |

індію. Під час першого етапу травлення спостерігається активне витравлювання атомів індію та фосфору, що призводить до насичення електроліту. Далі відбувається альтернативний процес – а саме осідання продуктів реакції на поверхню.

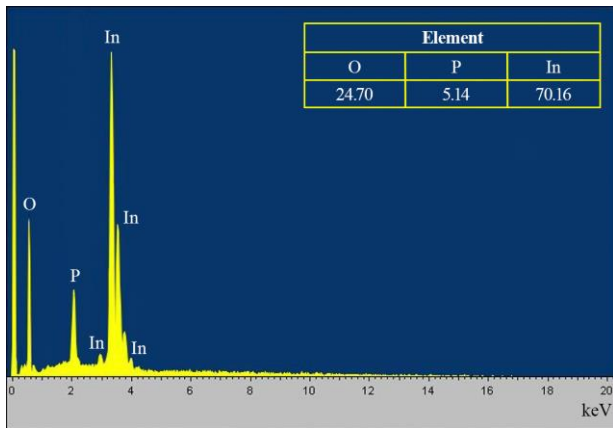


Рис. 2. Результати EDX-аналізу в точці на поверхні кристаліту.

III. Обговорення

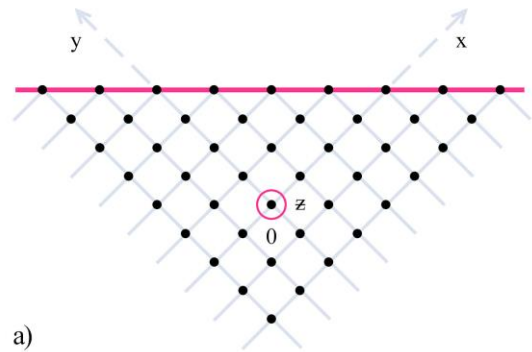
3.1 Механізм утворення періодичних структур на поверхні фосфіду індію по типу «паркет»

Монокристалічні напівпровідники, леговані до високих концентрацій неосновних носіїв заряду характеризуються наявністю великої кількості дислокацій. У експерименті ми використовували пластини InP з орієнтацією поверхні (111) (рис. 3а). В об'ємі такого зразка будуть спостерігатися джерела дислокаційних петель прямокутної форми, систему ковзання яких можна представити як поверхню паралелограма з гранями вздовж плоскостей (101) та (110) (рис. 3б).

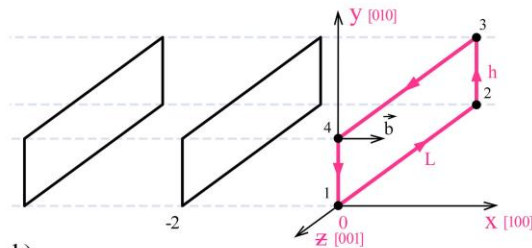
Дислокаційні петлі мають тенденцію до розповсюдження та руху завдяки дії сил взаємного відштовхування. Такий рух відбувається в напрямку поверхні зразка та припиняється в момент виходу дислокації на поверхню (рис. 3 в). Вихід першої (головної петлі дислокації) на поверхню спричинить появу сходинки. Три інші петлі (набігаючі) в системі дислокації закріплюються і їхніх рух припиняється. Таким чином можемо спостерігати скупчення дислокацій.

Також з рис. 3б можна зробити важливе спостереження. Дислокаційна петля під час руху до поверхні зразка не зміщується вздовж напрямків [010] і [001] (на рис. 3б вісі OY і OZ відповідно). Суперпозиція компонент сил Піча-Келлера у цьому випадку дорівнює нулю по всіх напрямках, крім напрямку [100] (вісь OX). Це спричинить порушення симетрії дислокаційних первинної та набігаючої петель, що дозволить зміщення набігаючої петлі вздовж напрямку [010]. При подальшому ковзанні набігаючої дислокації вона потрапить у систему ковзання, вільну від перешкоди, що спричинена головною петлею скупчення дислокацій. Далі, під дією наступної дислокаційної петлі, вона буде просуватися в об'ємі зразка до виходу на поверхню.

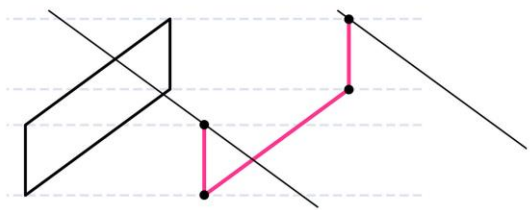
Наступні дислокаційні петлі будуть рухатися за тим самим механізмом.



a)



b)



c)

Рис.3. Модель закріплення дислокаційних петель: а) розташування плоскостей ковзання дислокацій; б) дислокаційні петлі в об'ємі n-InP (111) (; в) Закріплення дислокації на поверхні зразка, що спричинить появу сходинки.

Таким чином, джерела дислокаційних петель будуть ініціювати появу на поверхні зразка сходинок, що є періодичними ділянками неоднорідної деформації (рис. 4а). Це, в свою чергу дозволить сформувати рельєф поверхні зразка з періодичною архітектурою (рис. 4б).

Реальні кристали окрім ковзаючих дислокацій мають в об'ємі й інші види дефектів. Це спричиняє порушення симетрії взаємного розташування дислокаційних петель (ненульова суперпозиція компонент сили Піча-Келлера) (рис. 4с). Зміщення буде відбуватися вздовж напрямку ковзання [001]. Таким чином, на поверхні InP (111) буде спостерігатися укладання нанокристалічних дрітків у вигляді паркетних шаблів.

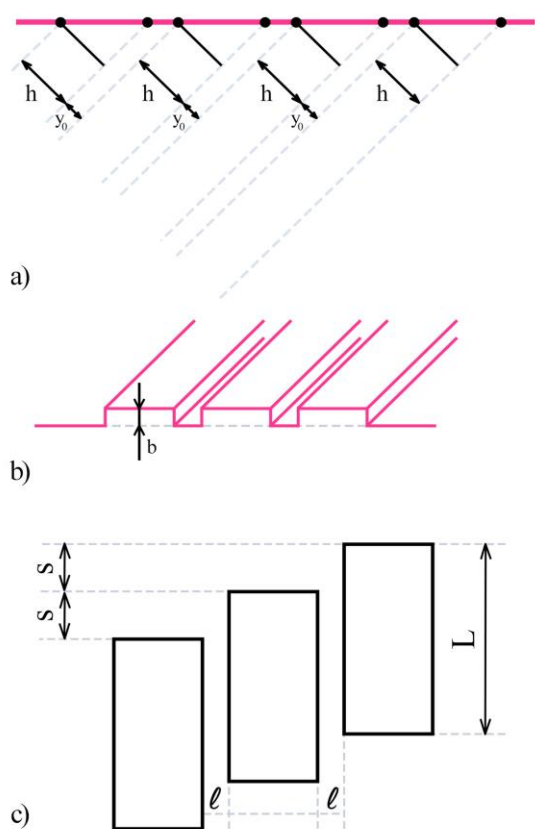


Рис.4. Система дислокаційних петель на поверхні InP (111) (а); схематичне зображення рельєфу поверхні з паркетними періодичними кристалітами (б) та відносно зміщення сходинок, що спричинено зміщенням головної і набігаючої дислокаційних петель (с).

3.2 Математична інтерпретація утворення паркетних періодичних наноструктур

Виходячи з цих міркувань, можемо представити описаний механізм математичною моделлю. Так, на одиниці довжини лінії дислокації діє компонент сили Піча-Келлера:

$$f_i = e_{ikl} \tau_k \sigma_{lm} b_m \quad (1)$$

де e_{ikl} – символ Леві-Чивіті; τ_k – компоненти одиничного вектору; σ_{lm} – компоненти тензора механічних напруг; b_m – компоненти вектору Бюргерса.

Суперпозиція компонент сили Піча-Келлера, яка діє на дислокаційну петлю вздовж напрямку [010] описується виразом:

$$F_y = -b^2 B \frac{h(3d^2+h^2)}{(d^2+h^2)^2} L, \quad (2)$$

$$B = \frac{\mu}{2\pi(1-\sigma)}$$

де b – модуль вектора Бюргерса; μ – модуль зсуву; σ – коефіцієнт Пуассона; h – розмір дислокаційної петлі вздовж напрямку [010]; d – відстань між дислокаційними петлями; L – розмір дислокаційної петлі [001].

Компонента сили Піча-Келлера на ділянці (1-2) (рис.3б) описується виразом:

$$F_y^{(1-2)} = -b^2 B \frac{(h+y_0)[3d^2+(h+y_0)^2]}{[d^2+(h+y_0)^2]^2} L, \quad (3)$$

де y_0 – модуль відстані дислокаційної петлі від ділянки (3-4) до площини ZOX.

Відповідно для ділянки (3-4) компонента сили Піча-Келлера (рис.3б) описується виразом:

$$F_y^{(3-4)} = b^2 B \frac{y_0(3d^2+y_0^2)}{(d^2+y_0^2)^2} L. \quad (4)$$

Виходячи з цього умова закріплення дислокаційної петлі відповідає виразу:

$$F_y^{(1-2)} + F_y^{(3-4)} = 0. \quad (5)$$

Важливим спостереженням є те, що довжина однієї паркетної шаблі дорівнює довжині ділянок (1-2) і (3-4) дислокаційних петель.

Сила Піча-Келлера, яка діє на дислокаційну петлю, паралельно напрямку [010]:

$$F_y = \pm b^2 B \frac{y(3d^2+y^2)}{(d^2+y^2)^2} L, \quad (6)$$

Екстремуми функції $F(y)$ мають значення:

$$y_1 = \sqrt{(2\sqrt{3}-3)}d \approx 0,681d,$$

$$y_2 = -\sqrt{(2\sqrt{3}-3)}d \approx -0,681d,$$

Умова стійкої рівноваги відносно зсуву дислокаційної петлі вздовж напрямку [010]:

$$y_0 = 0,681d - \frac{h}{2}. \quad (7)$$

Враховуючи, що кут між поверхнею зразка та площинами ковзання дислокацій дорівнює 45° , відстань між шаблями має значення:

$$l = \sqrt{2}y_0 = \sqrt{2}(0,681d - 0,5h) \quad (8)$$

Також можемо оцінити значення повздовжнього зміщення S дислокаційної петлі:

$$S = 2(h + y_0) = 2(0,5h) + 0,681d \quad (9)$$

Величини d і h приблизно рівні одна одній, що дає нам значення відстані між шаблями:

$$l \approx 0,256h; \quad S \approx 2,362h. \quad (10)$$

Можемо бачити, що проведене моделювання дає нам повну відповідність розрахункових та експериментальних значень.

Висновки

У роботі описано механізм формування на поверхні високолегованого монокристалічного фосфіду індію періодичних наноструктур, що є оксидними утвореннями та упаковані на поверхні по типу паркет. Досліджено морфологічні характеристики утворених нанодротів. Зокрема показано, що товщини нанодротів мають середнє значення 10 мкм, довжина знаходиться у діапазоні (100 – 130) мкм. EDX-аналіз показав, що нанодроти складаються переважно з атомів індію та кисню. Потребує подальшого дослідження фазовий склад утворених наноконструктив.

Запропоновано дислокаційний механізм формування нанодротів. Згідно цього механізму, рух дислокацій відбувається в напрямку поверхні зразка та припиняється в момент виходу дислокації на поверхню. Це спричиняє «набігання» наступних дислокацій, що призводить до появи на поверхні «сходинок». Ці сходинки є джерелами формування наноструктур, що розташовані на поверхні з певним періодом.

Дана математична інтерпретація запропонованого механізму та теоретично оцінено повздовжнє зміщення дислокаційної петлі та відстань між щаблями. Проведене моделювання дає повну відповідність розрахункових та експериментальних значень.

Подяка

Дослідження проведено завдяки підтримці Міністерства освіти на науки України, а саме реалізації держбюджетних наукових проєктів №0122U000129 «Пошук оптимальних умов синтезу наноструктур на поверхні напівпровідників A3B5, A2B6 і кремнію для фотоники і сонячної енергетики».

№ 0121U109426 «Теоретико-методичні засади системної фундаменталізації підготовки майбутніх фахівців у галузі наноматеріалознавства до продуктивної професійної діяльності».

Ми також дякуємо Збройним Силам України за забезпечення безпеки для виконання цієї роботи. Ця робота стала можливою лише завдяки стійкості та мужності Української Армії.

Ковачов С.С. – Науковий співробітник Бердянського державного педагогічного університету;

Богданов І.Т. – Доктор педагогічних наук, професор, Ректор Бердянського державного педагогічного університету;

Бардус І.О. – Доктор педагогічних наук, доцент, Професор кафедри комп'ютерних технологій в управлінні та навчанні й інформатики Бердянського державного педагогічного університету;

Дрожча Д.С. – Магістрант кафедри фізики та методики навчання фізики Бердянського державного педагогічного університету;

Тиховод К.М. – Старший лаборант кафедри фізики та методики навчання фізики Бердянського державного педагогічного університету;

Хрекін А.В. – Провідний фахівець кафедри фізики та методики навчання фізики Бердянського державного педагогічного університету;

Бондаренко В.В. – Асистент кафедри фізики та методики навчання фізики Бердянського державного педагогічного університету;

Косогов І.Г. – Старший науковий співробітник кафедри фізики та методики навчання фізики Бердянського державного педагогічного університету;

Сичікова Я.О. – Доктор технічних наук, професор, Проректор з наукової роботи Бердянського державного педагогічного університету. .

- [1] E. Monaico, I. Tiginyanu, V. Ursaki, *Porous semiconductor compounds*, *Semiconductor Science and Technology*, 35(10), 103001 (2020); <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab9477>.
- [2] Z. T. Karipbayev et al., *Optical, Structural, and Mechanical Properties of Gd₃Ga₅O₁₂ Single Crystals Irradiated with 84 Kr⁺ Ions*, *Physica Status Solidi (b)*, 2100415 (2022); <https://doi.org/10.1002/pssb.202100415>.
- [3] Y. He, M. Tsutsui, Y. Zhou, X. S. Miao, *Solid-state nanopore systems: from materials to applications*, *NPG Asia Materials*, 13(1), 1-26 (2021); <https://doi.org/10.1038/s41427-021-00313-z>.
- [4] G.-H. Lee et al., *Multifunctional materials for implantable and wearable photonic healthcare devices*, *Nature Reviews Materials*, 5 (2), 149 (2022); <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0167-3>.
- [5] Y. Liu et al., *Room temperature nanocavity laser with interlayer excitons in 2D heterostructures*, *Science Advances*, 5(4), (2019); <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav4506>.
- [6] D. Stange et al., *GeSn/SiGeSn Heterostructure and Multi Quantum Well Lasers*, *ACS Photonics*, 5 (11), 4628 (2018); <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01116>.
- [7] Y. Suchikova, V. Kidalov, and G. Sukach, *Blue Shift of Photoluminescence Spectrum of Porous InP*, *ECS Transactions*, 25 (24), 59 (2009); <https://doi.org/10.1149/1.3316113>.
- [8] B. K. SaifAddin et al., *Fabrication technology for high light-extraction ultraviolet thin-film flip-chip (UV TFCC) LEDs grown on SiC*, *Semiconductor Science and Technology*, 34(3), 035007 (2019); <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aaf58f>.
- [9] Y. Suchikova, *Provision of environmental safety through the use of porous semiconductors for solar energy sector*, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 5 (84) 26–33 (2016); <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85848>.
- [10] T. Sato, X. Zhang, K. Ito, S. Matsumoto, Y. Kumazaki, *Electrochemical formation of N-type GaN and N-type InP porous structures for chemical sensor applications*. In 2016 IEEE SENSORS (1-3) (2016); <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808443>.

- [11] J.-J. Zhang et al., *Oriented arrays of Co₃O₄ nanoneedles for highly efficient electrocatalytic water oxidation*, *Chemical Communications*, 55 (27), 3971 (2019); <https://doi.org/10.1039/c9cc00791a>.
- [12] W. Huang, C. Gatel, Z.-A. Li, and G. Richter, *Synthesis of magnetic Fe and Co nano-whiskers and platelets via physical vapor deposition*, *Materials & Design*, 208, 109914 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109914>.
- [13] M. Kwoka, E. Comini, D. Zappa, and J. Szuber, *Flower-like ZnO Nanostructures Local Surface Morphology and Chemistry*, *Nanomaterials*, 12 (15), 2666 (2022); <https://doi.org/10.3390/nano12152666>.
- [14] S. Yana, *Porous indium phosphide: Preparation and properties*. Handbook of Nanoelectrochemistry: Electrochemical Synthesis Methods, Properties, and Characterization Techniques, 283 (2016); https://doi.org/10.1007/978-3-319-15266-0_28.
- [15] S. Vambol, et al., *Research into effect of electrochemical etching conditions on the morphology of porous gallium arsenide*, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 5 (90), 22 (2017); <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118725>.
- [16] A. Gapeeva et al., *Electrochemical Surface Structuring for Strong SMA Wire–Polymer Interface Adhesion*, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13 (18), 21924 (2021); <https://doi.org/10.1021/acsami.1c00807>.
- [17] D. Wu et al., *Self-organization of polymer nanoneedles into large-area ordered flowerlike arrays*, *Applied Physics Letters*, 95 (9), 091902 (2009); <https://doi.org/10.1063/1.3213394>.
- [18] X. Liang, R. Dong, and J. C. Ho, *Self-Assembly of Colloidal Spheres toward Fabrication of Hierarchical and Periodic Nanostructures for Technological Applications*, *Advanced Materials Technologies*, 4 (3), 1800541 (2019); <https://doi.org/10.1002/admt.201800541>.
- [19] I.-T. Chen, E. Schappell, X. Zhang, and C.-H. Chang, *Continuous roll-to-roll patterning of three-dimensional periodic nanostructures*, *Microsystems & Nanoengineering*, 6 (1), (2020); <https://doi.org/10.1038/s41378-020-0133-7>.
- [20] Y.A. Suchikova, V.V. Kidalov, G.A. Sukach, *Influence of type anion of electrolit on morphology porous inp obtained by electrochemical etching*, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 1(4), 78 (2009).
- [21] S. S. Kovachov et al., *Chemical evaluation of the quality of nanostructures synthesized on the surface of indium phosphide*, *Archives of Materials Science and Engineering*, 1 (110), 18 (2021); <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.3592>.
- [22] Y. Suchikova, S. Kovachov, I. Bohdanov, *Formation of oxide crystallites on the porous GaAs surface by electrochemical deposition*. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 12, (2022); <https://doi.org/10.1177/18479804221127307>.
- [23] Y. Suchikova, S. Vambol, V. Vambol, N. Mozaffari, and N. Mozaffari, *Justification of the most rational method for the nanostructures synthesis on the semiconductors surface*, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 1-2 (92), 19 (2019); <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.3184>.
- [24] S. O. Vambol et al., *Formation of Filamentary Structures of Oxide on the Surface of Monocrystalline Gallium Arsenide*, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 9 (6), 06016–1 (2017) [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(6\).06016](https://doi.org/10.21272/jnep.9(6).06016).
- [25] J. Zhang et al., *Boosting the catalytic activity of a step-scheme In₂O₃/ZnIn₂S₄ hybrid system for the photofixation of nitrogen*, *Chinese Journal of Catalysis*, 43 (2), 265 (2022); [https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(21\)63801-9](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(21)63801-9).
- [26] A. Usseinov et al., *Vacancy Defects in Ga₂O₃: First-Principles Calculations of Electronic Structure*, *Materials*, 14 (23), 7384 (2021); <https://doi.org/10.3390/ma14237384>.
- [27] A. Usseinov et al., *Ab-Initio Calculations of Oxygen Vacancy in Ga₂O₃ Crystals*, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 58 (2), 3 (2021); <https://doi.org/10.2478/lpts-2021-0007>.
- [28] V. Kumar, S. M. Majhi, K.-H. Kim, H. W. Kim, and E. E. Kwon, *Advances in In₂O₃-based materials for the development of hydrogen sulfide sensors*, *Chemical Engineering Journal*, 404, 126472 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126472>.
- [29] I.V. Rogozin, *Nitrogen-doped p-type ZnO thin films and ZnO/ZnSe p-n heterojunctions grown on ZnSe substrate by radical beam gettering epitaxy*, *Thin Solid Films*, 517(15), 4318 (2009); <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.12.002>.
- [30] Z. Zhang, M. Wang, F. Wang, *Plasma-assisted construction of CdO quantum dots/CdS semi-coherent interface for the photocatalytic bio-CO evolution*, *Chem Catalysis*, 2, 1 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.checat.2022.04.001>.
- [31] V. Serga, R. Burve, A. Krumina, M. Romanova, E. A. Kotomin, A. I. Popov, *Extraction–pyrolytic method for TiO₂ polymorphs production*, *Crystals*, 11(4), 431 (2021); <https://doi.org/10.3390/cryst11040431>.
- [32] Y. Suchikova, A. Lazarenko, S. Kovachov, A. Usseinov, Z. Karipbaev, and A. I. Popov, *Formation of porous Ga₂O₃/GaAs layers for electronic devices*, in 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, Feb. 22–26, (2022); <https://doi.org/10.1109/tcset55632.2022.9766890>.
- [33] B. Khorshidi, I. Biswas, T. Ghosh, T. Thundat, and M. Sadrzadeh, *Robust fabrication of thin film polyamide-TiO₂ nanocomposite membranes with enhanced thermal stability and anti-biofouling propensity*, *Scientific Reports*, 8 (1), (2018); <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18724-w>.

- [34] A. Uzum, I. Kanmaz, *Passivation properties of HfO₂-SiO₂ mixed metal oxide thin films with low reflectivity on silicon substrates for semiconductor devices*, Thin Solid Films, 738, 138965 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138965>.
- [35] R. J. Theeuwes et al., *PO_x/Al₂O₃ stacks for surface passivation of Si and InP*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 246, 111911 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111911>.
- [36] C. Wang, L. Peng, Q. Qian, J. Du, S. Wang, and Y. Huang, *Tuning the Carrier Confinement in GeS/Phosphorene van der Waals Heterostructures*, Small, 14 (10), 1703536 (2018); <https://doi.org/10.1002/smll.201703536>.
- [37] D. Coelho, J. P. R. S. Gaudêncio, S. A. Carminati, F. W. P. Ribeiro, A. F. Nogueira, and L. H. Mascaro, *Bi electrodeposition on WO₃ photoanode to improve the photoactivity of the WO₃/BiVO₄ heterostructure to water splitting*, Chemical Engineering Journal, 399, 125836 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125836>.
- [38] L. Maduro, M. Noordam, M. Bolhuis, L. Kuipers, and S. Conesa-Boj, *Position-Controlled Fabrication of Vertically Aligned Mo/MoS₂ Core-Shell Nanopillar Arrays*, Advanced Functional Materials, 32 (5), 2107880 (2021); <https://doi.org/10.1002/adfm.202107880>.
- [39] Y. A. Suchikova, V. V. Kidalov, and G. A. Sukach, *Influence of dislocations on the process of pore formation in n-InP (111) single crystals*, Semiconductors, 45(1), 121 (2011); <https://doi.org/10.1134/s1063782611010192>.

S. Kovachov, I. Bohdanov, I. Bardus, D. Drozhcha, K. Tikhovod, A. Khrekin,
V. Bondarenko, I. Kosogov, Y. Suchikova

About synthesis mechanism of periodic oxide nanocrystallites on surface of single-crystal

Berdyansk State Pedagogical University, Berdyansk, Ukraine, yanasuchikova@gmail.com

We have obtained unique periodic oxide nanocrystallites on the surface of indium phosphide. The morphological characteristics of the structures obtained and their component composition are investigated in the article. The main attention is focused on explaining the mechanism of the periodic structures, which are packed by the 'parquet floor' type. The mechanism based on sliding the sources of rectangular-shaped dislocation loops has been proposed. The system of the main and secondary (ingoing) dislocations that cause the formation of the steps has been considered. The mathematical interpretation of the described model has also been proposed.

Keywords: indium phosphide, nanocrystallites, periodic structures, nanowires.