

**БЕРДЯНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Факультет фізико-математичної, комп'ютерної та технологічної освіти  
Кафедра фізики та методики навчання фізики

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**  
на тему

**СИНТЕЗ ПЕРІОДИЧНИХ ОКСИДНИХ НАНОКРИСТАЛІТІВ ПО  
ТИПУ «ПАРКЕТ» НА ПОВЕРХНІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО INP**

Здобувача другого рівня вищої освіти  
2 курсу м2 ПФН групи  
спеціальності  
105 Прикладна фізика та наноматеріали  
Дарії ДРОЖЧІ

Керівник – доктор технічних наук,  
професор, проректор з наукової роботи  
БДПУ  
Яна СИЧКОВА

Кількість балів: \_\_\_\_\_  
Національна шкала \_\_\_\_\_  
Оцінка: ECTS \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(підписи членів комісії) (ім'я та прізвище членів комісії)

м. Бердянськ – 2022 рік

## ЗМІСТ

### ВСТУП

.....	3
<b>РОЗДІЛ 1. Наноструктурування поверхні монокристалічного фосфіду індію.....</b>	<b>6</b>
1.1. Загальні дані про фосфід індію.....	7
1.2. Методи отримання.....	9
1.3. Застосування у мікроелектроніці.....	13
<b>РОЗДІЛ 2. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ .....</b>	<b>16</b>
2.1. Експеримент.....	16
2.1.1. Зразки для експерименту.....	17
2.1.2. Пристрій.....	18
2.1.3. Умови експерименту.....	19
2.1.4. Характеризація зразків.....	20
2.2. Результати експерименту.....	21
2.2.1 Дослідження морфологічних властивостей поверхні .....	22
2.2.2 Дослідження хімічного складу утворених кристалітів .....	24
<b>РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА ІНТЕРПРИТАЦІЯ УТВОРЕННЯ ПАРКЕТНИХ ПЕРІОДИЧНИХ НАНОСТРУКТУР.....</b>	<b>27</b>
3.1 Механізм утворення періодичних структур на поверхні фосфіду індію по типу «паркет».....	27
3.2 Математична модель та перевірка відповідності експериментальним результатам.....	31
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>35</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>37</b>

## **ВСТУП**

### **Актуальність**

Потреба у нових «розумних» матеріалах зумовлена зростаючим попитом на високотехнологічну електроніку. Композитні матеріали знайшли широке використання у приладах фотоніки. Гетероструктури широко використовуються як матеріали для лазерів. Планарні наноструктури представляють значний інтерес для тонкоплівкових технологій, зокрема для створення світлодіодів. Останнім часом увага дослідників зосереджується на матеріалах з розвиненою архітектурою поверхні. Сьогодні успішно синтезують наноголки, нановіскери, структури подібні квітам, поруваті поверхні тощо. Крім того, набувають значної популярності періодичні структури. Перевага таких структур над іншими видами наноструктурованих наноматеріалів зумовлюється можливістю контролювати довжини хвиль, кути випромінення тощо.

Розуміння цих трендів ставить перед науковцями дві задачі: (1) підбір ефективних недорогих методів синтезу, що дозволяють створювати періодичні наноструктури із керованими властивостями; (2) підбір компонентів системи підкладка/наноструктура з добре узгодженими параметрами.

Сьогодні активно досліджуються методи синтезу оксидних напівпровідників та інтеграція їх на підкладки. Так, популярними об'єктами досліджень є  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdO}$ ,  $\text{TiO}_2$  тощо. Такі напівпровідники демонструють чудову здатність до наноструктурування, є хімічно і термічно стабільними. Крім того, оксидні плівки на поверхні напівпровідника проявляють пасивуючі властивості та дозволяють продовжувати строки служби приладів. 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.

З іншого боку, така ситуація може ефективно використовуватися при формуванні структур з нестандартною морфологією. У цьому випадку дефекти вихідного напівпровідника (підкладки) є джерелами зародження наноструктури на поверхні. Ефективне використання цього явища є доволі складною задачею та потребує детального вивчення.

Актуальність теми зумовлюється протиріччям між наявною потребою у нових функціональних матеріалах та недосконалістю методів їхнього синтезу.

**Об'єктом дослідження** є методика синтезу періодичних наноструктур на поверхні напівпровідників.

**Предмет дослідження:** періодичні наноструктури на поверхні монокристалічного фосфіду індію.

**Мета дослідження:** удосконалити метод синтезу періодичних наноструктур на поверхні фосфіду індію та дослідити їхні властивості

**Завдання:**

1. Проаналізувати технології синтезу наноструктур на поверхні напівпровідників та основні методи дослідження поверхні.
2. Удосконалити метод синтезу наноструктур на поверхні фосфіду індію
3. Дослідити морфологічні властивості сформованих періодичних наноструктур на поверхні фосфіду індію.
4. Дослідити хімічний склад поверхневих шарів.
5. Запропонувати механізм утворення періодичних структур на поверхні фосфіду індію по типу «паркет».
6. Розробити математичну модель утворення оксидних періодичних кристалітів на поверхні фосфіду індію та перевірити її відповідність експериментальним результатам.

**Наукова новизна**

1. Удосконалено метод синтезу наноструктур на поверхні фосфіду індію шляхом використання двохетапної технології хімічного травлення, що дозволило сформувати наноструктури високої якості.

2. Набули подальшого розвитку теоретичні аспекти механізму утворення періодичних структур на поверхні напівпровідників, який базується на уявленні про ковзання дислокацій в об'ємі кристалу та дозволяє розширити його на більший клас напівпровідників.

3. Вперше математично інтерпретовано запропонований механізм механізму утворення періодичних структур на поверхні напівпровідників шляхом теоретичної оцінки повздовжнього зміщення дислокаційної петлі та відстань між шаблями.

### **Практична значимість**

Запропонований метод синтезу періодичних структур на поверхні фосфіду індію, які упаковані по типу паркет дозволяє оптимізувати технології отримання наноструктур з контрольованими заздалегідь визначеними властивостями.

Такі структури є перспективними для вивчення так як періодичність може ефективно використовуватися для створення фотокаталітичних гетероструктур та хвилеводів.

### **Апробація та публікації**

За результатами досліджено підготовлено та направлено до опублікування статтю у журнал, який індексується БД Scopus. Стаття вийде у 4 томі 2022 р.:

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. Фізика і хімія твердого тіла. 2022 р. том №4.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізували технології синтезу наноструктур на поверхні напівпровідників. Встановили, що наноструктури на поверхні монокристалічного InP можна формувати методами реактивного магнетронного розпилення, матричного синтезу, електрохімічного осадження, електрохімічного травлення, літографії та ін

Більшість з цих методів потребують вартісного обладнання та вакуумних технологій. Тому нами запропоновано використання більш дешевих та простих методів синтезу.

2. Удосконалили метод синтезу наноструктур на поверхні фосфіду індію. Зокрема, нами запропоновано використання комбінованого хімічного методу травлення, який складається з двох етапів. Перший етап проводили у режимі електрохімічного анодування при постійній густині струму. На другому етапі використовували просте електрохімічне травлення без дії струму. Це дозволило сформувати періодичні наноструктури високої якості.

3. Дослідили морфологічні властивості сформованих періодичних наноструктур на поверхні фосфіду індію. На поверхні було сформовано масивні кристалічні нанодроти, які розташовані по типу паркет. Показано, що товщини нанодротів мають середнє значення 10 нм, довжина знаходиться у діапазоні (100 – 130) нм. EDX-аналіз показав, що нанодроти складаються переважно з атомів індію та кисню. Потребує подальшого дослідження фазовий склад утворених нанокомпозитів.

4. Дослідили хімічний склад поверхневих шарів за допомогою EDX аналізу. Кристаліти утворені оксидом індію з невеликим вмістом фосфору. Це певним чином свідчить про механізм утворення періодичних нанокристалітів на поверхні фосфіду індію.

5. 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.

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

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Третяк О.В., Лозовський В.З. Основи фізики напівпровідників: підручник. – К., 2009. — 383 с.
2. Deng, T., Li, M., Wang, Y., & Liu, Z. (2015). Development of solid-state nanopore fabrication technologies. *Science bulletin*, 60(3), 304-319. DOI:10.1007/s11434-014-0705-8
3. Osgood, Richard Jr. (2021). Principles of photonic integrated circuits : materials, device physics, guided wave design. Xiang Meng. Cham. ISBN 978-3-030-65193-0. OCLC 1252762727
4. He, Y., Tsutsui, M., Zhou, Y., & Miao, X. S. (2021). Solid-state nanopore systems: from materials to applications. *NPG Asia Materials*, 13(1), 1-26. DOI: 10.1038/s41427-021-00313-z
5. Plesa, C., Verschueren, D., Pud, S., Van Der Torre, J., Ruitenber, J. W., Witteveen, M. J., ... & Dekker, C. (2016). Direct observation of DNA knots using a solid-state nanopore. *Nature nanotechnology*, 11(12), 1093-1097. DOI: 10.1038/nnano.2016.153
6. 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*, vol. 208, p. 109914, Oct. 2021. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109914>
7. Sychikova Ya.A. Vliyanie sostava elektrolita na velichinu porogovogo napryazheniya nachala poroobazovaniya fosfida indiya//FIP. - 2010. – Т. 8, №3. – С. 259-264.
8. Ivanou, D. K., Streltsov, E. A., Fedotov, A. K., Mazanik, A. V., Fink, D., & Petrov, A. (2005). Electrochemical deposition of PbSe and CdTe nanoparticles onto p-Si (100) wafers and into nanopores in SiO<sub>2</sub>/Si (100) structure. *Thin Solid Films*, 490(2), 154-160. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.04.046
9. Weng, Z., Chai, X., Liu, L., Li, L., Xu, H., Song, Z., ... & Liang, K. (2017). Effects of temperature and current density on the porous structure of InP.

- Journal of Solid State Electrochemistry, 21(2), 545-553. DOI: 10.1007/s10008-016-3387-0
10. Sato, T., Zhang, X., Ito, K., Matsumoto, S., & Kumazaki, Y. (2016). Electrochemical formation of N-type GaN and N-type InP porous structures for chemical sensor applications. In 2016 IEEE SENSORS (1-3). IEEE. DOI: 10.1109/ICSENS.2016.7808443
  11. Suchikova, Y.A., Kidalov, V.V., Sukach, G.A. (2011) Influence of dislocations on the process of pore formation in n-InP (111) single crystals. Semiconductors, 45(1), 121–124. DOI: 10.1134/S1063782611010192
  12. Lee, E., Menumerov, E., Hughes, R. A., Neretina, S., & Luo, T. (2018). Low-Cost nanostructures from nanoparticle-assisted large-scale lithography significantly enhance thermal energy transport across solid interfaces. ACS applied materials & interfaces, 10(40), 34690-34698. DOI: 10.1021/acsami.8b08180
  13. Monaico, E., Monaico, E. I., Ursaki, V. V., Tiginyanu, I. M., & Nielsch, K. (2019). Electrochemical deposition by design of metal nanostructures. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 55(4), 367-372. DOI: 10.3103/S1068375519040070
  14. Delimitis, A., Komninou, P., Kehagias, T., Pavlidou, E., Karakostas, T., Gladkov, P., & Nohavica, D. (2008). Controlled growth of porous networks in phosphide semiconductors. Journal of Porous Materials, 15(1), 75-81. DOI: 10.1007/s10934-006-9054-6
  15. Suchikova J.A., Kidalov V.V., Sukach G.A. Morphology of porous n-InP (100) obtained by electrochemical etching in HCl solution//Functional Materials 17. – 2010. – № 1. – P. 1-4.
  16. Suzuki, K., Sato, S., & Fujita, M. (2010). Template synthesis of precisely monodisperse silica nanoparticles within self-assembled organometallic spheres. Nature chemistry, 2(1), 25-29. DOI: 10.1038/nchem.446
  17. Ben Amara, E., Lebib, A., & Beji, L. (2020). Structural and Electrical Investigation of Porous GaAs Layers on Different Crystallographically

- Oriented GaAs Substrates. *Journal of Electronic Materials*, 49(9), 5281-5292. DOI: 10.1007/s11664-020-08294-5
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*, vol. 4, no. 3, p. 1800541, Jan. 2019. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/admt.201800541>
19. R. J. Theeuwes et al., "PO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stacks for surface passivation of Si and InP," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 246, p. 111911, Oct. 2022. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111911>
20. Gerngross, M. D., Carstensen, J., & Föll, H. (2012). Electrochemical and galvanic fabrication of a magnetoelectric composite sensor based on InP. *Nanoscale research letters*, 7(1), 1-5. DOI: 10.1186/1556-276X-7-379
21. Korotcenkov, G., & Cho, B. K. (2010). Porous semiconductors: advanced material for gas sensor applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 35(1), 1-37. DOI: 10.1080/10408430903245369
22. Suchikova, J.A., Kidalov, V.V., Sukach, G.A. (2009) Blue shift of photoluminescence spectrum of porous InP. *ECS Transactions*, 25(24), 59–64. DOI: 10.1149/1.3316113
23. Cheng, H., Xiao, R., Bian, H., Li, Z., Zhan, Y., Tsang, C. K., ... & Li, Y. Y. (2014). Periodic porous silicon thin films with interconnected channels as durable anode materials for lithium ion batteries. *Materials Chemistry and Physics*, 144(1-2), 25-30. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.12.003
24. Indium Phosphide and Indium Gallium Arsenide Help Break 600 Gigahertz Speed Barrier. April 2005
25. V. Kumar, S. M. Majhi, K.-H. Kim, H. W. Kim, and E. E. Kwon, "Advances in In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based materials for the development of hydrogen sulfide sensors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 404, p. 126472, Jan.

2021. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126472>
26. Zhang, J. J., Ding, P., Jin, Y. N., Meng, S. H., Zhao, X. Q., Hu, Y. F., Jin, Z.: A comparative study on radiation reliability of composite channel InP high electron mobility transistors. *Chinese Physics B*, 30(7), 070702 (2021). <https://doi.org/10.1088/1674-1056/abe2fd>
27. Zhu, Y., Chen, X., Ma, Y., Zhang, Y., Du, B., Shi, Y., & Gu, Y.: Surface and optical properties of silicon nitride deposited by inductively coupled plasma-chemical vapor deposition. *Journal of Semiconductors*, 39(8), 083005 (2018). <https://doi.org/10.1088/1674-4926/39/8/083005>
28. Vambol, S., Bogdanov, I., Vambol, V., ...Hurenko, O., Onishchenko, S. (2017) Research into regularities of pore formation on the surface of semiconductors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5-87), 37–44. DOI 10.1134/S1063782611010192
29. Suchikova, Y.A., Kidalov, V.V., Sukach, G.A. (2010) Influence of the carrier concentration of indium phosphide on the porous layer formation. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2(4), 75–81.
30. Yana, S. Porous indium phosphide: Preparation and properties. *Handbook of Nanoelectrochemistry: Electrochemical Synthesis Methods, Properties, and Characterization Techniques*, 2016, стр. 283–306
31. A. Eb, A.M. Gonçalves, L. Santinacci, C. Mathieu, A. Etcheberry. Pore growth on n -InP in liquid ammonia: electrode potential and morphology evolution // *Physica status solidi (c)*. 5(11),pp. 3484-3487 (2007)
32. A. Gapeeva et al., "Electrochemical Surface Structuring for Strong SMA Wire–Polymer Interface Adhesion," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 13, no. 18, pp. 21924–21935, Apr. 2021. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c00807>
33. A. Usseinov et al., "Ab-Initio Calculations of Oxygen Vacancy in Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Crystals," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 58, no.

- 2, pp. 3–10, Mar. 2021. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/lpts-2021-0007>
- 34.A. Usseinov et al., "Vacancy Defects in Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: First-Principles Calculations of Electronic Structure," *Materials*, vol. 14, no. 23, p. 7384, Dec. 2021. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma14237384>
- 35.A. Uzum and I. Kanmaz, "Passivation properties of HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> mixed metal oxide thin films with low reflectivity on silicon substrates for semiconductor devices," *Thin Solid Films*, vol. 738, p. 138965, Nov. 2021. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138965>
- 36.B. K. SaifAddin et al., "Fabrication technology for high light-extraction ultraviolet thin-film flip-chip (UV TFFC) LEDs grown on SiC," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 34, no. 3, p. 035007, Jan. 2019. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aaf58f>
- 37.B. Khorshidi, I. Biswas, T. Ghosh, T. Thundat, and M. Sadrzadeh, "Robust fabrication of thin film polyamide-TiO<sub>2</sub> nanocomposite membranes with enhanced thermal stability and anti-biofouling propensity," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, Jan. 2018. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18724-w>
- 38.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*, vol. 14, no. 10, p. 1703536, Jan. 2018. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/sml.201703536>
- 39.D. Coelho, J. P. R. S. Gaudêncio, S. A. Carminati, F. W. P. Ribeiro, A. F. Nogueira, and L. H. Mascaro, "Bi electrodeposition on WO<sub>3</sub> photoanode to improve the photoactivity of the WO<sub>3</sub>/BiVO<sub>4</sub> heterostructure to water splitting," *Chemical Engineering Journal*, vol. 399, p. 125836, Nov. 2020.

- Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125836>
- 40.D. Stange et al., "GeSn/SiGeSn Heterostructure and Multi Quantum Well Lasers," *ACS Photonics*, vol. 5, no. 11, pp. 4628–4636, Oct. 2018. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01116>
- 41.D. Wu et al., "Self-organization of polymer nanoneedles into large-area ordered flowerlike arrays," *Applied Physics Letters*, vol. 95, no. 9, p. 091902, Aug. 2009. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.3213394>
- 42.G.-H. Lee et al., "Multifunctional materials for implantable and wearable photonic healthcare devices," *Nature Reviews Materials*, vol. 5, no. 2, pp. 149–165, Jan. 2020. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0167-3>
- 43.I. Bohdanov, Y. Suchikova, S. Kovachov, A. Dauletbekova, A. Usseinov, and A. I. Popov, "Nanostructure Formation on ZnSe Crystal Surface by Electrochemical Etching," in *2021 IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, Odessa, Ukraine, Sep. 5–11, 2021. IEEE, 2021. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/nap51885.2021.9568629>
- 44.I.-T. Chen, E. Schappell, X. Zhang, and C.-H. Chang, "Continuous roll-to-roll patterning of three-dimensional periodic nanostructures," *Microsystems & Nanoengineering*, vol. 6, no. 1, Apr. 2020. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41378-020-0133-7>
- 45.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>
46. Investigations of porous InP properties by XRD, IR, USXES, XANES and PL techniques E.P. Domashevskaya, V.M. Kashkarov, P.V. Seredin, V.A.

- Terekhov, S.Yu. Turishchev, I.N. Arsenyev, V.P. Ulin / *Materials Science and Engineering B*. 147, pp. 144-147 (2008).
47. Investigations of porous InP properties by XRD, IR, USXES, XANES and PL techniques E.P. Domashevskaya, V.M. Kashkarov, P.V. Seredin, V.A. Terekhov, S.Yu. Turishchev, I.N. Arsenyev, V.P. Ulin / *Materials Science and Engineering B*. 147, pp. 144-147 (2008)., P. Schmuki, U. Schlierf, T. Herrmann, G. Champion. Pore initiation and growth on n-InP(100) // *Electrochimica Acta*. 48, pp. 1301-1308 (2003)
48. J. Zhang et al., "Boosting the catalytic activity of a step-scheme In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> hybrid system for the photofixation of nitrogen," *Chinese Journal of Catalysis*, vol. 43, no. 2, pp. 265–275, Feb. 2022. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(21\)63801-9](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(21)63801-9)
49. J.-J. Zhang et al., "Oriented arrays of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoneedles for highly efficient electrocatalytic water oxidation," *Chemical Communications*, vol. 55, no. 27, pp. 3971–3974, 2019. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1039/c9cc00791a>
50. L. Maduro, M. Noordam, M. Bolhuis, L. Kuipers, and S. Conesa-Boj, "Position-Controlled Fabrication of Vertically Aligned Mo/MoS<sub>2</sub> Core–Shell Nanopillar Arrays," *Advanced Functional Materials*, vol. 32, no. 5, p. 2107880, Oct. 2021. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/adfm.202107880>
51. Lazarenko, A.S., Mikhailovskij, I.M., Rabukhin, V.B., Velikodnaya, O.A. (1995) Nanotopography and grain-boundary migration in the vicinity of triple junctions. *Acta Metallurgica Et Materialia*, 43(2), 639–643. DOI: 10.1016/0956-7151(94)00228-A
52. Lionel Santinacci, Thierry Djenizian. Electrochemical pore formation onto semiconductor surfaces // *Comptes Rendus Chimie*, 11, pp.964-983 (2008).
53. M. Kwoka, E. Comini, D. Zappa, and J. Szuber, "Flower-like ZnO Nanostructures Local Surface Morphology and Chemistry,"

- Nanomaterials, vol. 12, no. 15, p. 2666, Aug. 2022. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/nano12152666>
54. Monaco, E., Tiginyanu, I., & Ursaki, V. (2020). Porous semiconductor compounds. *Semiconductor Science and Technology*, 35(10), 103001. DOI: 10.1088/1361-6641/ab9477
55. P. Schmuki, U. Schlierf, T. Herrmann, G. Champion. Pore initiation and growth on n-InP(100) // *Electrochimica Acta*. 48, pp. 1301-1308 (2003) Šimkiene, I., Kindurys, A., Treideris, M., & Sabataityte, J. (2008). Formation of Porous n-A3B5 Compounds. *Acta. Phys. Pol. A*, 3(113), 1085-1090.
56. Praveenkumar, S., Lingaraja, D., Mathi, P. M., & Ram, G. D. (2019). An experimental study of optoelectronic properties of porous silicon for solar cell application. *Optik*, 178, 216-223. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.09.176
57. S. O. Vambol et al., "Formation of Filamentary Structures of Oxide on the Surface of Monocrystalline Gallium Arsenide," *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 9, no. 6, pp. 06016–1—06016–4, 2017. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(6\).06016](https://doi.org/10.21272/jnep.9(6).06016)
58. 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*, vol. 1, no. 110, pp. 18–26, Jul. 2021. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.3592>
59. S. Vambol, I. Bogdanov, V. Vambol, Y. Suchikova, H. Lopatina, and N. Tsybuliak, "Research into effect of electrochemical etching conditions on the morphology of porous gallium arsenide," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, 5 (90), pp. 22–31, Dec. 2017. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118725>

60. Sato Taketomo, Fujino Toshiyuki and Hasegawa Hideki. Self-Assembled Formation of Uniform InP Nanopore Arrays by Electrochemical Anodization in HCl based Electrolyte // *Applied Surface Science*, 252, pp. 5457-5461 (2006)
61. Suchikova, J.A. (2015). Synthesis of indium nitride epitaxial layers on a substrate of porous indium phosphide. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 7(3), 03017.
62. Suchikova, Y.A., Kidalov, V.V., Sukach, G.A. Influence of type anion of electrolyte on morphology porous InP obtained by electrochemical etching. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2009, 1(4), стр. 78–86
63. Suchikova, Y., Vambol, S., Vambol, V., Mozaffari, N. (2019) Justification of the most rational method for the nanostructures synthesis on the semiconductors surface. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 92(1-2), 19-28. DOI: 10.5604/01.3001.0013.3184
64. Sychikova Ya.A., Kidalov V.V., Sukach G.A. Issledovanie polos rosta fosfida indiya metodom selektivnogo elektrohimicheskogo travleniya // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. – 2010. – № 1. – S. 52-57.
65. Sychikova Ya.A., Kidalov V.V., Sukach G.A. Vliyanie dislokacij na process poroobrazovaniya v monokristallah n-InP(111) // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. – 2011. – T. 45, № 1. – S. 123-126.
66. Sychikova Ya.A., Kidalov V.V., Balan O.S., Sukach G.O. Testirovaniya poverhni fosfidu indiyu // *Zh. nano- i elektron. fiz.* – 2010. – № 1. – S. 84-88.
67. The Light Brigade appeared in Red Herring in 2002. Archived June 7, 2011, at the Wayback Machine
68. V. Serga, R. Burve, A. Krumina, M. Romanova, E. A. Kotomin, A. I. Popov, Extraction–pyrolytic method for TiO<sub>2</sub> polymorphs production, *Crystals*, 11(4), 431 (2021); <https://doi.org/10.3390/cryst11040431>

69. Villarroel, R., Espinoza-Gonzalez, R., Lisoni, J., & Gonzalez-Moraga, G. (2018). Influence of the oxygen consumption on the crystalline structure of titanium oxides thin films prepared by DC reactive magnetron sputtering. *Vacuum*, 154, 52-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.04.049>
70. Wei, C., Wu, G., Yang, S., & Liu, Q. (2016). Electrochemical deposition of layered copper thin films based on the diffusion limited aggregation. *Scientific Reports*, 6(1), 1-7. DOI: 10.1038/srep34779
71. 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>
72. Y. Liu et al., "Room temperature nanocavity laser with interlayer excitons in 2D heterostructures," *Science Advances*, vol. 5, no. 4, Apr. 2019, Art. no. eaav4506. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav4506>
73. Y. Suchikova, "Provision of environmental safety through the use of porous semiconductors for solar energy sector," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, 5 (84), pp. 26–33, Dec. 2016. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85848>
74. Y. Suchikova, A. Lazarenko, S. Kovachov, A. Usseinov, Z. Karipbaev, and A. I. Popov, "Formation of porous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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. IEEE, 2022. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tcset55632.2022.9766890>
75. 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, vol. 1-2, no. 92, pp. 19–28, Jan. 2019. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.3184>
76. Y. Suchikova, V. Kidalov, and G. Sukach, "Blue Shift of Photoluminescence Spectrum of Porous InP," ECS Transactions, vol. 25, no. 24, pp. 59–64, Dec. 2019. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1149/1.3316113>
77. Yana, S. (2016) Porous indium phosphide: Preparation and properties. Handbook of Nanoelectrochemistry: Electrochemical Synthesis Methods, Properties, and Characterization Techniques, 283–306. DOI: 10.1007/978-3-319-15266-0\_9
78. Z. T. Karipbayev et al., "Optical, Structural, and Mechanical Properties of Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Single Crystals Irradiated with 84 Kr<sup>+</sup> Ions," physica status solidi (b), p. 2100415, Jan. 2022. Accessed: Sep. 11, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/pssb.202100415>
79. 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>
80. Пат. 49947 Україна, МПК(2006): G01N 27/00. Спосіб отримання поруватої поверхні фосфіду індію р-типу методом фотоелектрохімічного травлення/Сичікова Я.О., Кідалов В.В., Сукач Г.О.; заявник та патентовласник Сичікова Я.О. – u201003113; заявл. 18.03.2010; опубл. 11.05.2010. Бюл. № 9/2010.