

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

Випускна кваліфікаційна робота
на здобуття освітнього ступеня магістр на тему:

**МЕХАНІЗМ ФОРМУВАННЯ ЛАНЦЮГОВИХ
ТА КРИСТАЛОГРАФІЧНО ОРІЄНТОВАНИХ ПОР НА ПОВЕРХНІ n-InP**

Виконала здобувач вищої освіти 2 курсу групи М2ПФН
спеціальності: 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Бондаренко Вікторія Володимирівна

Керівник д.тех.н., професор Сичікова Я.О.

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент Коломоєць Г.Г.

Бердянськ – 2023 р.

Зміст

ВСТУП	2
РОЗДІЛ 1 Класифікація пор, сформованих на поверхні напівпровідників	6
1.1 Класифікація пор за розміром	6
1.2 Класифікація пор за морфологією	7
1.3 Класифікація пор за механізмом формування	9
РОЗДІЛ 2 Методика експерименту	11
2.1 Підготовка зразків	11
2.2 Електрохімічне травлення монокристалічного фосфіду індію	12
РОЗДІЛ 3 Механізм формування ланцюгових та кристалографічно орієнтованих пор на поверхні n-InP	14
3.1 Морфологія поруватих шарів, сформованих на поверхні InP	14
3.2 Механізм електрохімічного розчинення поверхні InP (111)	18
3.3 Етапи пороутворення на поверхні n-InP (111)	20
ВИСНОВКИ	24
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	25

ВСТУП

За останні роки потреба в кристалах з підвищеною структурною досконалістю для використання у виробництві електронних приладів і при дослідженні механізму пластичної деформації сприяла модифікації методів синтезу наноструктур на поверхні напівпровідників [1, 2]. Сьогодні відомо безліч методів синтезу наноструктур. Автори роботи [3] отримували кристали ZnO шляхом опромінення ацетату цинку лазером у рідині. У результаті було синтезовано наностержні та наносфери. Наноструктури триоксиду вольфраму (WO_3) синтезували із застосуванням золь-гелю та гідротермальних методів з дигідрату вольфрамату натрію [4]. Цікавими також представляються дослідження, що спрямовані на синтез порошків α -трикальцію фосфату (α -TCP), легованих Mn^{2+} методом вологого спільного осадження з подальшим високотемпературним відпалом та термічним загартуванням [5]. Всі зразки, леговані Mn, демонстрували широкосмугове випромінювання в діапазоні від 525 до 825 нм з максимальним центром близько 630 нм. Найвища інтенсивність викидів спостерігалася для зразка з найбільшим вмістом Mn. На поверхні напівпровідників наноструктури формують методом гідротермального синтезу [6]. Для отримання високоякісних низькорозмірних гетероструктур цікавим і дієвим методом є налаштування хімічного складу в одній наноструктурі для отримання двох або декількох компонентів з добре узгодженими електронними смуговими структурами [7]. Такий метод дозволяє гетероструктури халькогенідів в одновимірних нанопроволоках, квазіодновимірних нанопоясах і двовимірних атомних наноструктурованих шарах [8, 9]. Цей підхід дозволив синтезувати велике розмаїття нових гетероструктур, які не тільки демонструють градієнтний розподіл за хімічним складом, але й чіткі інтерфейси та унікальну геометрію [10, 11]. Попри різноманіття наявних методів електрохімічна технологія обробки поверхні кристалів залишається усталеним та економічно

вигідним підходом для виготовлення поруватих напівпровідникових матриць із спеціальною архітектурою в масштабі субмікрметрів [12, 13].

Наноструктуровані напівпровідники перспективні для наноелектронних [14], оптоелектронних [15], нанофотонних [16] застосувань. Цікавим напрямом є заповнення пор металевими наноструктурами [17, 18]. Так, у роботі [19] було розроблено метод модифікування поверхні шаром нанокомпозиту, який складався з електроосаджених нанорозмірних срібних структур та термочутливого гідрогелю.

Автори роботи [20] пропонують виготовляти наноструктурований кремній з двома різними вбудованими магнітними наноструктурами (Ni/Co), це дає змогу застосовувати його як постійний наномагніт.

Іntenсивно розвиваються напрямки електрохімічного анодування кристалів для виготовлення на їх основі 2D нанотрубок та нанопроволок [21, 22]. Такий інтерес до наноструктурування поверхні напівпровідників зумовлений, насамперед, появою квантоворозмірних ефектів [23]. Поруваті напівпровідники у цьому сенсі представляють найбільший інтерес завдяки простоті їх синтезу та різноманіттю геометричних форм. Трикутні пори було сформовано на поверхні GaAs (112) [24]. Пори, що мають у поперечному перерізі рівносторонні чотирикутники отримують при використанні шаблонів за допомогою фотолітографії [25]. Дрібну сітку округлих форм було сформовано на поверхні InP [26] Такі пори орієнтовані перпендикулярно поверхні та мають циліндричну форму [27].

На поверхні бінарних напівпровідників групи A3B5 часто вдається сформувати пори кристалографічно орієнтовані [28, 29]. Такі поруваті поверхні представляють інтерес з точки зору дослідження механізму самоорганізації формування наноструктур на поверхні напівпровідників [30, 31].

Не дивлячись на досягнутий прогрес, зараз немає загального розуміння механізму формування кристалографічно-орієнтованих пор, так званих “cristo pores”. Це питання потребує детального опрацювання для кожного

напівпровідника. В свою чергу, це допоможе сформувати загальну картину самоорганізації росту пор на поверхні напівпровідника та дозволить уніфікувати вимоги до технології синтезу даного типу наноструктур.

Пропоноване дослідження зосереджено на виявленні механізму утворення кристопор на поверхні фосфіду індію, як одного з найперспективніших матеріалів сучасної оптоелектроніки. Результати розробленого механізму порівнюються із спеціальними експериментами, що проводились з цією метою, і зі старими результатами, які не були повністю оцінені або не були повністю зрозумілі в минулому.

Об'єктом дослідження є процеси пороутворення на поверхні фосфіду індію.

Предмет дослідження: ланцюгові та кристалографічно орієнтовані пори на поверхні монокристалічного фосфіду індію.

Мета дослідження: синтезувати поруваті шари на поверхні монокристалічного фосфіду індію та встановити механізм формування ланцюгових і кристалографічних пор.

Для досягнення мети було поставлено такі **завдання:**

1. Проаналізувати типи пор у напівпровідниках.
2. Удосконалити метод формування поруватих шарів на поверхні напівпровідників
3. Дослідити морфологічні властивості сформованих поруватих шарів.
4. Запропонувати механізм утворення ланцюгових і кристалографічних пор на поверхні фосфіду індію.

Наукова новизна:

1. Удосконалено метод синтезу поруватих шарів на поверхні фосфіду індію.
2. Набули подальшого розвитку теоретичні аспекти механізму утворення ланцюгових і кристалографічних пор на поверхні фосфіду індію.

3. Вперше якісно інтерпретовано запропонований механізм механізму утворення ланцюгових і кристалографічних пор на поверхні фосфіду індію.

Практична значимість

Запропонований метод синтезу поруватих шарів на поверхні фосфіду індію 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.

Важливим практичним результатом є отримання патентів на корисну модель:

1. Патент на корисну модель № 150697 «Спосіб отримання високопоруватих шарів селеніду цинку» Богданов Ігор Тимофійович (UA); Сичікова Яна Олександрівна (UA); Ковачов Сергій Сергійович (UA); Лазаренко Андрій Степанович (UA); Шишкін Геннадій Олександрович (UA); Бондаренко Вікторія Володимирівна (UA); Піменов Дмитро Олексійович (UA); Тиховод Катерина Миколаївна (UA); Медведенко Олександр Миколайович (UA). Дата подання заявки: 11.08.2021; Дата, з якої є чинними права: 17.03.2022. Патент опубліковано 16.03.2022, бюл. № 11/2022;

2. Патент на корисну модель № 150656 «Спосіб отримання мезопоруватого шару на поверхні селеніду цинку» Сичікова Яна Олександрівна (UA); Ковачов Сергій Сергійович (UA); Богданов Ігор Тимофійович (UA); Лазаренко Андрій Степанович (UA); Шишкін Геннадій Олександрович (UA); Бондаренко Вікторія Володимирівна (UA); Піменов Дмитро Олексійович (UA); Тиховод Катерина Миколаївна (UA); Медведенко Олександр Миколайович (UA); Єфіменко Юрій Олександрович (UA). Дата подання заявки: 11.08.2021; Дата, з якої є чинними права: 17.03.2022. Патент опубліковано 16.03.2022, бюл. № 11/2022.

ВИСНОВКИ

1. Підсумовуючи, можна резюмувати, що процеси пороутворення на поверхні напівпровідників групи АЗВ5 загалом та InP зокрема, це складна багатостадійна взаємодія напівпровідника з рідкою фазою електроліту. Багатостадійність зумовлюється процесами самоорганізації, що відбуваються на межі розділу кристал/електроліт.
2. Вирішальне значення для формування розвинутого поруватого шару мають стан поверхні вихідної напівпровідникової пластини та його параметри. Так, було показано, що на поверхні p-InP майже неможливо сформувати впорядковану систему пор звичайним електрохімічним травленням. Кристалічні зразки з n-типом провідності легко піддаються електрохімічній обробці. Макроморфологія зразків при цьому буде залежати від типу провідності вихідного кристалу. Масивні кристо-пори формуються на (111)-орієнтованих поверхнях, дрібні та перпендикулярно розташовані до поверхні циліндричні пори – на (100) орієнтованих зразках.
3. Кількість пор, їх діаметр та довжина зумовлюються технологічними режимами обробки напівпровідника, зокрема часом травлення та щільністю струму. При деяких умовах на поверхні формується оксидний шар, що перешкоджає формуванню рівномірного поруватого шару. Для подолання цього явища доцільно вводити у склад електроліту етиловий спирт.
4. Якщо поширення пор в кристалі InP відбувається уздовж напрямків (111) тільки однієї полярності, то спостерігається тенденція до групування нових отворів навколо раніше утворених ямок травлення. Це явище зумовлюється виходами на поверхню протяжних кристалічних дефектів – дислокацій. Цим пояснюється поява треків, терас травлення та виходу на поверхню кристалу відгалужених каналів вторинних пор.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Naji, S., Zaari, H., Al-Ammari, A., Benyoussef, A., & Ennaoui, A. (2021). On the electronic properties and performance of new nano thick solar material based on GeSe/SnS hetro-bilayer. *Optical and Quantum Electronics*, 53(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02683-0>
2. Khodabakhshi, F., Gerlich, A. P., Verma, D., Nosko, M., & Haghshenas, M. (2021). Depth-sensing thermal stability of accumulative fold-forged nanostructured materials. *Materials & Design*, Vol. 202. 109554. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109554>
3. Ridha, N. J., Alosfur, F. K. M., Kadhim, H. B. A., Aboud, L. H., & Al-Dahan, N. (2020). Novel method to synthesis ZnO nanostructures via irradiation zinc acetate with a nanosecond laser for photocatalytic applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 9835-9845. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03528-y>
4. Jamali, M., & Tehrani, F. S. (2020). Effect of synthesis route on the structural and morphological properties of WO₃ nanostructures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 107, 104829. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104829>
5. Sinusaite, L., Antuzevics, A., Popov, A. I., Rogulis, U., Misevicius, M., Katelnikovas, A., ... & Zarkov, A. (2021). Synthesis and luminescent properties of Mn-doped alpha-tricalcium phosphate. *Ceramics International*, 47(4), 5335-5340. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.114>
6. Li, Y., Lu, Y. L., Wu, K. D., Zhang, D. Z., Debliquy, M., & Zhang, C. (2020). Microwave-assisted hydrothermal synthesis of copper oxide-based gas-sensitive nanostructures. *Rare Metals*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12598-020-01557-4>
7. Li, H., Wang, X., Zhu, X., Duan, X., & Pan, A. (2018). Composition modulation in one-dimensional and two-dimensional chalcogenide

semiconductor nanostructures. *Chemical Society Reviews*, 47(20), 7504-7521.

<https://doi.org/10.1039/C8CS00418H>

8. Kuang, M., Han, P., Huang, L., Cao, N., Qian, L., & Zheng, G. (2018). Electronic Tuning of Co, Ni-Based Nanostructured (Hydr) oxides for Aqueous Electrocatalysis. *Advanced Functional Materials*, 28(52), 1804886.

<https://doi.org/10.1002/adfm.201804886>

9. Li, X., Lou, L., Song, W., Zhang, Q., Huang, G., Hua, Y., ... & Zhang, X. (2017). Controllably manipulating three-dimensional hybrid nanostructures for bulk nanocomposites with large energy products. *Nano letters*, 17(5), 2985-2993.

<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00264>

10. Ma, Y., Ma, M., Yin, X., Shao, Q., Lu, N., Feng, Y., ... & Guo, Z. (2018). Tuning polyaniline nanostructures via end group substitutions and their morphology dependent electrochemical performances. *Polymer*, 156, 128-135.

<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.09.051>

11. Huang, G., Li, X., Lou, L., Hua, Y., Zhu, G., Li, M., ... & Zhang, X. (2018). Engineering bulk, layered, multicomponent nanostructures with high energy density. *Small*, 14(22), 1800619.

<https://doi.org/10.1002/sml.201800619>

12. Monaico, E. I., Monaico, E. V., Ursaki, V. V., Honnali, S., Postolache, V., Leistner, K., ... & Tiginyanu, I. M. (2020). Electrochemical nanostructuring of (111) oriented GaAs crystals: from porous structures to nanowires. *Beilstein Journal of Nanotechnology*,

11(1), 966-975.

<https://doi.org/10.3762/bjnano.11.81>

13. Suohikova, Y., Vambol, S., Vambol, V., Mozaffari, N., Mozaffari, N. Justification of the most rational method for the nanostructures synthesis on the semiconductors surface. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2019, 92(1-2), стр. 19–28. DOI 10.5604/01.3001.0013.3184

14. Balakhayeva, R., Akilbekov, A., Baimukhanov, Z., Usseinov, A., Giniyatova, S., Zdorovets, M., ... & Dauletbekova, A. (2021). CdTe Nanocrystal Synthesis in SiO₂/Si Ion-Track Template: The Study of Electronic and Structural Properties. *physica status solidi (a)*, 218(1), 2000231. <https://doi.org/10.1002/pssa.202000231>
15. Khrypunov, G., Vambol, S., Deyneko, N., Suchikova, Y. Increasing the efficiency of film solar cells based on cadmium telluride (2016) *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (5), pp. 12-18. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85617
16. Popov, A. I., & Krainyukova, N. V. (2020). Low-temperature radiation effects and surface phenomena in the wide-bandgap materials. 46, 1147 (2020); <https://doi.org/10.1063/10.0002463>
17. Granitzer, P., & Rumpf, K. (2020). Metal filled nanostructured silicon with respect to magnetic and optical properties. *Frontiers in Physics*, 8, 121. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00121>
18. Sulciute, A., Nishimura, K., Gilshtein, E., Cesano, F., Viscardi, G., Nasibulin, A. G., ... & Rackauskas, S. (2021). ZnO Nanostructures Application in Electrochemistry: Influence of Morphology. *The Journal of Physical Chemistry C*, 125(2), 1472-1482. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c08459>
19. Kaniewska, K., Baçal, P., Sawicka, M., Stojek, Z., & Karbarz, M. (2020). Nanocomposite hydrogel coatings: Formation of metal nanostructures by electrodeposition through thermoresponsive hydrogel layer. *Electrochimica Acta*, 363, 137243. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137243>
20. Rumpf, K., Granitzer, P., Gonzalez-Rodriguez, R., Coffey, J., & Reissner, M. (2020). Arrays of Ni/Co Nanoparticles within a Nanostructured Silicon Host. *physica status solidi (a)*, 217(8), 1901040. <https://doi.org/10.1002/pssa.201901040>
21. Vambol, S. O., Bohdanov, I. T., Vambol, V. V., Suchikova, Y. O., Kondratenko, O. M., Nestorenko, T. P., & Onyschenko, S. V. (2017).

Formation of filamentary structures of oxide on the surface of monocrystalline gallium arsenide. *Journal of Nano-and Electronic Physics*, 9(6). DOI:10.21272/jnep.9(6).06016

22. Prachamon, W., Limpijumnong, S., & Komin, S. (2020). Density-functional study of hydrazine doped single-walled carbon nanotubes as an n-type semiconductor. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 124, 114306. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2020.114306>

23. Yang, Z., Zhu, Z., Pan, X., Ma, Z., & Zhang, X. (2020). Ultrafine Cu₂ZnSnS₄ quantum dots functionalized TiO₂ nanotube arrays for potential optoelectronic applications. *Ceramics International*, 46(3), 2940-2948. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.290>

24. Langa, S., Carstensen, J., Christophersen, M., Föll, H., & Tiginyanu, I. M. (2001). Observation of crossing pores in anodically etched n-GaAs. *Applied Physics Letters*, 78(8), 1074-1076. <https://doi.org/10.1063/1.1350433>

25. Kelly, J. J., & Philipsen, H. G. (2005). Anisotropy in the wet-etching of semiconductors. *Current opinion in solid state and materials science*, 9(1-2), 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2006.04.003>

26. Sychikova, Y. A., Kidalov, V. V., & Sukach, G. A. (2013). Dependence of the threshold voltage in indium-phosphide pore formation on the electrolyte composition. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 7(4), 626-630. <https://doi.org/10.1134/S1027451013030130>

27. Influence of current density of anodizing on the geometric characteristics of nanostructures

synthesized on the surface of semiconductors of A₃B₅ group and silicon. Sychikova, Y.O.,

Bogdanov, I.T., Kovachov, S.S. *Functional Materials*, 2019, 27(1), стр. 29–3. <https://doi.org/10.15407/fm27.01.29>

28. Suchikova, Y.A., Kidalov, V.V., Sukach, G.A. Influence of type anion of electrolit on morphology porous inp obtained by electrochemical etching (2009) Journal of Nano- and Electronic Physics, 1 (4), pp. 78-86.
29. Lomov, A. A., Punegov, V. I., Vasil'ev, A. L., Nohavica, D., Gladkov, P., Kartsev, A. A., & Novikov, D. V. (2010). X-ray diffraction analysis of multilayer porous InP (001) structure. Crystallography Reports, 55(2), 182-190. <https://doi.org/10.1134/S1063774510020033>
30. Li, X. (2011). Self-rolled-up microtube ring resonators: a review of geometrical and resonant properties. Advances in Optics and Photonics, 3(4), 366-387. <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000366>
31. Föll, H., Langa, S., Carstensen, J., Christophersen, M., & Tiginyanu, I. M. (2003). Pores in III–V semiconductors. Advanced materials, 15(3), 183-198. <https://doi.org/10.1002/adma.200390043>
32. Suchikova, Y.O. Sulfide passivation of indium phosphide porous surfaces (2017) Journal of Nano- and Electronic Physics, 9 (1), 01006. DOI: 10.21272/jnep.9(1).01006
33. KiranT., AhmedH.M.P., BegumN.S., KannanK. and RadhikaD. 2020. Structural, morphological and optical studies of sol-gel engineered Sm³⁺ activated ZnO thin films for photocatalytic applications . Physics and Chemistry of Solid State. 21, 3 (Sep. 2020), 433-439. DOI:<https://doi.org/10.15330/pcss.21.3.433-439>.
34. Vambol, S., Vambol, V., Suchikova, Y., Deyneko, N. Analysis of the ways to provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle (2017) Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (10-85), pp. 27-36. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.85847
35. Suchikova, J.A., Kidalov, V.V., Sukach, G.A. Blue shift of photoluminescence spectrum of porous InP (2010) ECS Transactions, 25 (24), pp. 59-64. DOI: 10.1149/1.3316113

36. Li, Q., Zheng, M., Ma, L., Zhong, M., Zhu, C., Zhang, B., ... & Shen, W. (2016). Unique three-dimensional InP nanopore arrays for improved photoelectrochemical hydrogen production. *ACS applied materials & interfaces*, 8(34), 22493-22500. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b06200>
37. Vambol, S., Bogdanov, I., Vambol, V., Suchikova, Y., Kondratenko, O., Hurenko, O., Onishchenko, S. Research into regularities of pore formation on the surface of semiconductors (2017) *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (5-87), pp. 37-44. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.104039
38. Ulin, V. P., Ulin, N. V., & Soldatenkov, F. Y. (2017). Anodic processes in the chemical and electrochemical etching of Si crystals in acid-fluoride solutions: Pore formation mechanism. *Semiconductors*, 51(4), 458-472. <https://doi.org/10.1134/S1063782617040212>
39. Lim, W. F., Hassan, Z., Ahmed, N. M., & Quah, H. J. (2018). Porous formation in p-type gallium nitride films via 50 Hz operated alternating current-assisted photo-electrochemical etching in methanol-sulfuric acid solution. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(10), H620. <https://doi.org/10.1149/2.0591810jes>
40. Volovlikova, O., Gavrilov, S., & Lazarenko, P. (2020). Influence of illumination on porous silicon formed by photo-assisted etching of p-type Si with a different doping level. *Micromachines*, 11(2), 199. <https://doi.org/10.3390/mi11020199>
41. Suchikova, Y.A., Kidalov, V.V., Sukach, G.A. Influence of dislocations on the process of pore formation in n-InP (111) single crystals (2011) *Semiconductors*, 45 (1), pp. 121-124. DOI: 10.1134/S1063782611010192
42. Monaico, E., Tiginyanu, I., & Ursaki, V. (2020). Porous semiconductor compounds. *Semiconductor Science and Technology*, 35(10), 103001. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab9477>
43. Monaico, E., Colibaba, G., Nedeoglo, D., & Nielsch, K. (2014). Porosification of III–V and II–VI semiconductor compounds. *Journal of*

<https://doi.org/10.1166/jno.2014.1581>

44. Tiginyanu, I. M., Ursaki, V. V., Monaico, E., Foca, E., & Föll, H. (2007). Pore etching in III-V and II-VI semiconductor compounds in neutral electrolyte. *Electrochemical and Solid State Letters*, 10(11), D127.

<https://doi.org/10.1149/1.2771076>

45. Patel, A. R., & Sangval, K. (1976). Adsorption mechanism during selective pickling of crystals. *Kristallografiya*, 21(3), 557-563.

46. Urusovskaya, A. A., Knab, G. G., & Sangval, K. (1979). Deceleration centres of dislocations in γ -irradiated LiF crystals. *Kristallografiya*, 24(1), 171-174.

47. Ulin, V. P., & Konnikov, S. G. (2007). Electrochemical pore formation mechanism in III-V crystals (Part I). *Semiconductors*, 41(7), 832-844.

<https://doi.org/10.1134/S1063782607070111>

48. Zegrya, G. G., Ulin, V. P., Zegrya, A. G., Ulin, N. V., & Mikhailov, Y. M. (2019). Effect of Conductivity Type and Doping Level of Silicon Crystals on the Size of Formed Pore Channels during Anodic Etching in Hydrofluoric Acid Solutions. *Technical Physics*, 64(10), 1492-1500.

<https://doi.org/10.1134/S1063784219100268>

49. AL-Khoury, W., Naddaf, M., & Ahmad, M. (2021). MeV-Fe ions implantation of GaAs-Induced morphological and structural modification of porous GaAs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 492, 1-6.

<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.02.001>

50. Suchikova, Y.O., Bogdanov, I.T., Kovachov, S.S. Oxide crystals on the surface of porous indium phosphide (2019) *Archives of Materials Science and Engineering*, 98 (2), pp. 49-56. DOI: 10.5604/01.3001.0013.4606

51. Jo Jung-Ho, Photostability enhancement of InP/ZnS quantum dots enabled by In₂O₃ overcoating., *Journal of Alloys and Compounds* 647 (2015) 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.245>
52. Y. Robach, Passivation of InP using In (PO₃)₃-condensed phosphates: From oxide growth properties to metal-insulator-semiconductor field-effect-transistor devices, *Journal of applied physics* 71(6) (1992) 2981–2992. <https://doi.org/10.1063/1.351002>
53. Emel'yanov, V. I., Eremin, K. I., & Starkov, V. V. E. (2002). Defect-deformation mechanism of spontaneous nucleation of an ensemble of pores in solids and its experimental verification. *Quantum Electronics*, 32(6), 473. <https://doi.org/10.1070/QE2002v032n06ABEH002225>
54. Ling, T., Zou, X., Cheng, J., Yang, Y., Ren, H., & Chen, D. (2018). Modulating surface morphology related to crystallization speed of perovskite grain and semiconductor properties of optical absorber layer under controlled doping of potassium ions for solar cells. *Materials*, 11(9), 1605. <https://doi.org/10.3390/ma11091605>