

**Міністерство освіти і науки України**  
Бердянський державний педагогічний університет  
кафедра фізики, математики та методики навчання

«Допущено до захисту»  
Завідувач кафедрою  
д.п.н., проф. Олександр ШКОЛА  
«12» грудня 2024 р.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШАРІВ НАТИВНОГО ОКСИДУ  
НА ПОРИСТИЙ АРСЕНІД ГАЛІЮ**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконавець: здобувач другого рівня вищої освіти, групи м2пфн

Галузь знань: 10 Природничі науки

Спеціальність: 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Освітньо-професійна програма: Прикладна фізика та наноматеріали

ПІБ: Денис ГАРМАШ

Керівник: д.техн.н., професор Яна СИЧКОВА

Рецензент: д.техн.н., проф. Ярослав ЖИДАЧЕВСЬКИЙ

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Гармаш Денис Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження впливу шарів нативного оксиду на пористий арсенід галію»

Керівник роботи: Сичікова Я.О., д.техн.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «18» листопада 2024 року № 685с.

2. Строк подання студентом роботи: 09.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: дослідження впливу оксидних наноструктур на електронні та оптичні властивості пористого арсеніду галію та визначення можливості їхнього використання для пасивації поверхні

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

- проаналізувати сучасні методи формування та дослідження наноструктур на поверхні напівпровідників;
- розробити й оптимізувати методику електрохімічного синтезу оксидних наноструктур на поверхні пористого GaAs;
- дослідити морфологічні, оптичні та структурні властивості оксидних наноструктур, утворених на поверхні GaAs;
- запропонувати механізм утворення оксидних наноструктур на поверхні пористого арсеніду галію та оцінити їхню стабільність.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) (за необхідністю):

---

---

---

6. Консультанти розділів роботи (якщо передбачені):

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: 18.11.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Формулювання теми кваліфікаційної роботи, підготовка вступу, складання плану роботи.	грудень 2023 р.	
2.	Аналіз літературних джерел за темою дослідження, уточнення базових понять дослідження. Підготовка розділу 1.	лютий – травень 2024 р.	
3.	Підготовка розділу 2 та висновків.	червень - вересень 2024 р.	
4.	Підготовка розділу 3 та висновків.	жовтень – листопад 2024 р.	
5.	Оформлення підсумкового варіанту кваліфікаційної роботи відповідно до чинних вимог.	09.12.2024 р.	

Здобувач вищої освіти:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Денис ГАРМАШ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи:

  
\_\_\_\_\_

(підпис)

Яна СИЧІКОВА

(прізвище та ініціали)

## *ЗМІСТ*

ВСТУП. ....	3
РОЗДІЛ 1. Огляд поточної ситуації. ....	5
РОЗДІЛ 2. Матеріали і методи. ....	8
РОЗДІЛ 3. Вплив шарів нативного оксиду на пористий арсенід галію. ...	10
ВИСНОВКИ. ....	27
Перелік використаних джерел. ....	28

## ВСТУП

У сучасній напівпровідниковій технології створення матеріалів з унікальними електронними та оптичними властивостями є ключовим завданням для розвитку нових поколінь пристроїв. Пористі напівпровідники, зокрема арсенід галію (GaAs), відкривають широкі можливості для виготовлення високоефективних сенсорів, світлодіодів та лазерів завдяки регульованій морфології та високій поверхневій активності. Однак проблема поверхневих станів і дефектів у пористих структурах залишається актуальною, оскільки вони суттєво впливають на ефективність та стабільність пристроїв.

Використання оксидних шарів, таких як арсеноліт ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ), є перспективним підходом для пасивації поверхні пористого GaAs, зменшення безвипромінювальної рекомбінації та підвищення довговічності матеріалів. Нативні оксиди, що утворюються природно під час електрохімічної обробки, можуть забезпечити безшовний інтерфейс із підкладкою, що робить їх особливо привабливими для інтеграції в напівпровідникові пристрої.

Метою даного дослідження є удосконалення методу синтезу оксидних наноструктур на поверхні пористого GaAs, аналіз їхніх характеристик і оцінка можливостей використання оксидних шарів для покращення електронних та оптичних властивостей матеріалу.

**Об'єкт дослідження:** процеси оксидування поверхні пористого арсеніду галію.

**Предмет дослідження:** оксидні наноструктури, утворені на поверхні пористого арсеніду галію внаслідок електрохімічної обробки.

**Мета дослідження:** дослідити вплив оксидних наноструктур на електронні та оптичні властивості пористого арсеніду галію та визначити можливості їхнього використання для пасивації поверхні.

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

1. Проаналізувати сучасні методи формування та дослідження наноструктур на поверхні напівпровідників.

2. Розробити й оптимізувати методику електрохімічного синтезу оксидних наноструктур на поверхні пористого GaAs.
3. Дослідити морфологічні, оптичні та структурні властивості оксидних наноструктур, утворених на поверхні GaAs.
4. Запропонувати механізм утворення оксидних наноструктур на поверхні пористого арсеніду галію та оцінити їхню стабільність.

#### **Наукова новизна:**

1. Вперше експериментально виявлено вплив оксидного шару  $As_2O_3$  на оптичні та структурні характеристики пористого GaAs, що дозволяє використовувати ці шари для пасивації поверхні.
2. Удосконалено метод електрохімічного травлення для синтезу пористого GaAs з контрольованими морфологічними характеристиками поверхні.
3. Розроблено теоретичну модель утворення оксидних наноструктур на основі механізму міграції іонів миш'яку в умовах електрохімічного травлення.

#### **Практична значимість:**

1. Запропонований підхід до синтезу оксидних наноструктур забезпечує підвищену стабільність та пасивацію пористого GaAs, що робить його перспективним для використання в оптоелектронних та сенсорних пристроях.
2. Отримані результати можуть бути впроваджені у виробничі процеси виготовлення високоякісних оптоелектронних пристроїв, таких як світлодіоди, лазери та фотодетектори.
3. Розроблені технологічні рекомендації щодо формування оксидних шарів можуть бути використані для підвищення довговічності напівпровідникових матеріалів в екстремальних умовах експлуатації.

## Висновки

1. У роботі проведено огляд сучасних методів формування наноструктур на поверхні напівпровідників. Електрохімічне травлення було визначено як оптимальний метод для створення пористої структури на поверхні GaAs завдяки його можливості точного контролю над морфологічними характеристиками. Основними методами аналізу, використаними в дослідженні, стали SEM, EDX, XRD, Raman і CL, які забезпечили комплексну оцінку структури, складу та оптичних властивостей зразків.

2. Розроблено вдосконалену методику електрохімічного травлення, що включає введення етанолу до травильного розчину для формування оксидного шару  $As_2O_3$  на поверхні пористого GaAs. Ця методика дозволила отримати октаедричні кристаліти  $As_2O_3$  з чітко вираженою морфологією, які утворюють окремий кристалічний шар.

3. SEM-аналіз підтвердив утворення високоякісної пористої структури на поверхні GaAs із нанорозмірними порами діаметром до 50 нм. На поверхні зразків із додатковим оксидним шаром спостерігалися октаедричні кристаліти  $As_2O_3$ , які утворювалися шляхом агрегації іонів миш'яку під дією локальних електричних полів.

4. Запропоновано механізм утворення оксидних наноструктур на основі міграції іонів миш'яку до поверхні пористого GaAs під час електрохімічної обробки. Формування кристалітів  $As_2O_3$  пояснюється процесами перенасичення та осадження, які стимулюються локальними електричними полями і градієнтами концентрації.

### Перелік використаних джерел

1. Karipbayev, Z.T.; Kumarbekov, K.; Manika, I.; Dauletbekova, A.; Kozlovskiy, A.L.; Sugak, D.; Ubizskii, S.B.; Akilbekov, A.; Suchikova, Y.; Popov, A.I. Optical, Structural, and Mechanical Properties of Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Single Crystals Irradiated with 84Kr<sup>+</sup> Ions. *Phys. Status Solidi B* **2022**, 2100415. <https://doi.org/10.1002/pssb.202100415>.
2. Usseinov, A.; Koishybayeva, Z.; Platonenko, A.; Akilbekov, A.; Purans, J.; Pankratov, V.; Suchikova, Y.; Popov, A.I. Ab-Initio Calculations of Oxygen Vacancy in Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Crystals. *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* 2021, 58, 3–10. <https://doi.org/10.2478/lpts-2021-0007>.
3. Sychikova, Y.A.; Kidalov, V.V.; Sukach, G.A. Dependence of the threshold voltage in indium-phosphide pore formation on the electrolyte composition. *J. Surf. Investig.* 2013, 7, 626–630. <https://doi.org/10.1134/S1027451013030130>.
4. Yana, S. Porous indium phosphide: Preparation and properties. In *Handbook of Nanoelectrochemistry: Electrochemical Synthesis Methods, Properties, and Characterization Techniques*; 2016; pp. 283–306. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-15266-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15266-0_9).
5. 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>
6. Monaico, E. V., Monaico, E. I., Ursaki, V. V., & Tiginyanu, I. M. (2023). Porous Semiconductor Compounds with Engineered Morphology as a Platform for Various Applications. *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters*. <https://doi.org/10.1002/pssr.202300039>
7. Zhang, Q., Wang, C., Tian, Y., Liu, Y., You, F., Wang, K., Wei, J., Long, L., & Qian, J. (2023). Growth of AgI semiconductors on tailored 3D porous Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene/graphene oxide aerogel to develop sensitive and selective “signal-on” photoelectrochemical sensor for H<sub>2</sub>S determination. *Analytica Chimica Acta*, 340845. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.340845>

8. Kim, C., Sul, J., & Moon, J. H. (2023). Semiconductor process fabrication of multiscale porous carbon thin films for energy storage devices. *Energy Storage Materials*, 57, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.02.026>
9. Han, Y., Li, S., Li, X., Ma, J., Ping, J., & Sun, Y. (2024). Study on Process Parameters of Magnetron Sputtering Titanium Coating in Deep Porous Structures. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00540>
10. Yang, X., Deng, Y., Yang, H., Liao, Y., Cheng, X., Zou, Y., Wu, L., & Deng, Y. (2022). Functionalization of Mesoporous Semiconductor Metal Oxides for Gas Sensing: Recent Advances and Emerging Challenges. *Advanced Science*, 2204810. <https://doi.org/10.1002/advs.202204810>
11. Nong, L. X., Nguyen, V. H., Lee, T., & Nguyen, T. D. (2022). Fabrication of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> with Simultaneous Isotype Heterojunction and Porous Structure for Enhanced Visible-Light-Driven Photocatalytic Performance Toward Tetracycline Hydrochloride Elimination. *Topics in Catalysis*. <https://doi.org/10.1007/s11244-022-01743-x>
12. Putta Rangappa, A., Praveen Kumar, D., Do, K. H., Wang, J., Zhang, Y., & Kim, T. K. (2023). Synthesis of Pore-Wall-Modified Stable COF/TiO<sub>2</sub> Heterostructures via Site-Specific Nucleation for an Enhanced Photoreduction of Carbon Dioxide. *Advanced Science*. <https://doi.org/10.1002/advs.202300073>
13. Vanin, A. I., Kumzerov, Y. A., Solov'ev, V. G., Khanin, S. D., Gango, S. E., Ivanova, M. S., Prokhorenko, M. M., Trifonov, S. V., Cvetkov, A. V., & Yanikov, M. V. (2021). Electrical and Optical Properties of Nanocomposites Fabricated by the Introduction of Iodine in Porous Dielectric Matrices. *Glass Physics and Chemistry*, 47(3), 229–234. <https://doi.org/10.1134/s1087659621030123>
14. Zhang, G., Li, X., Li, N., Wu, T., & Wang, L. (2023). Face-to-face heterojunctions within 2D/2D porous NiCo oxyphosphide/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> towards efficient and stable photocatalytic H<sub>2</sub> evolution. *Nano Research*. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-5352-6>

15. Pan, Y., Abazari, R., Tahir, B., Sanati, S., Zheng, Y., Tahir, M., & Gao, J. (2024). Iron-based metal–organic frameworks and their derived materials for photocatalytic and photoelectrocatalytic reactions. *Coordination Chemistry Reviews*, 499, 215538. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215538>
16. Venditto, V., Vaiano, V., & Sacco, O. (2023). Monolithic Porous Organic Polymer-Photocatalyst Composites for Applications in Catalysis. *ChemCatChem*. <https://doi.org/10.1002/cctc.202301118>
17. Zaky, Z. A., Al-Dossari, M., Saleh, N., M. Abdelhady, M., Sharma, A., Zhaketov, V. D., & Aly, A. H. (2023). Photonic crystal with magnified resonant peak for biosensing applications. *Physica Scripta*. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/accbf1>
18. Chandran, A., Abhirami, N., Sudhina, S., Chandran, M., & Janeesh, P. A. (2023). 2D Nano Covalent Organic Frameworks – A Porous Polymeric Promising Material Exploring New Prospects of Drug Delivery in Cancer Therapeutics. *ChemistrySelect*, 8(24). <https://doi.org/10.1002/slct.202301145>
19. Suchikova, J.A.; Kidalov, V.V.; Sukach, G.A. Blue shift of photoluminescence spectrum of porous InP. *ECS Trans.* 2009, 25, 59–64. <https://doi.org/10.1149/1.3316113>.
20. Suchikova, Y.; Kovachov, S.; Bohdanov, I.; Popova, E.; Moskina, A.; Popov, A. Characterization of CdxTeyOz/CdS/ZnO Heterostructures Synthesized by the SILAR Method. *Coatings* 2023, 13, 639. <https://doi.org/10.3390/coatings13030639>.
21. Kim, J., Chung, H.-S., Oh, K. H., Han, H. N., Lim, T., Lee, H.-J., & Kim, J. H. (2023). Robust Heteroepitaxial Growth of GaN Formulated on Porous TiN Buffer Layers. *Crystal Growth & Design*. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.3c00883>
22. Suchikova, Y.; Kovachov, S.; Bohdanov, I. Study of the structural and morphological characteristics of the CdxTeyOz nano-composite obtained on the surface of the CdS/ZnO heterostructure by the SILAR method. *Appl. Phys. A* 2023, 129, 499. <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06776-x>.

23. Vahidi, J., Akbari, H., & Ghasemi, S. E. (2023). An optimal analytical study on a solar photovoltaic system with different rates of absorbed photon and emitted electron. *Results in Engineering*, 101634. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101634>

24. Khelifa, A., Kabeel, A. E., Attia, M. E. H., Zayed, M. E., & Abdelgaied, M. (2023). Numerical analysis of the heat transfer and fluid flow of a novel water-based hybrid photovoltaic-thermal solar collector integrated with flax fibers as natural porous materials. *Renewable Energy*, 119245. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119245>

25. Poberezhnaya, U. M., Freiman, V. M., Ilyushin, M. A., Zegrya, G. G., Fadeev, D. V., Os'kin, I. A., Morozov, V. A., Grigor'ev, A. Y., & Savenkov, G. G. (2023). Optical and Electron-Beam Initiation of Porous Silicon Films with Different Contents of Oxidizer and Graphene. *Technical Physics*, 68(12), 721–726. <https://doi.org/10.1134/s1063784223080273>

26. Tran, B. A., Nguyen, M. T., Le, T. Q., Pham, T. C.-T., Pham, T.-P. T., Luu, A. T., & Nguyen, H.-D. (2024). High-performance red-emitting InGaN/AlGaIn nanowire light-emitting diodes grown through porous template. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 169, 107894. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107894>

27. Suchikova, Y. O. (2017). Sulfide Passivation of Indium Phosphide Porous Surfaces. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 9(1), 01006–1–01006–4. [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(1\).01006](https://doi.org/10.21272/jnep.9(1).01006)

28. 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. <https://doi.org/10.1080/10408430903245369>

29. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.104039>

30. Winter, E., Schreiber, W., Schygulla, P., Souza, P. L., Janz, S., Lackner, D., & Ohlmann, J. (2022). III-V Material Growth on Electrochemically Porosified Ge Substrates. *Journal of Crystal Growth*, 126980. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2022.126980>
31. Zakar, A., Wu, R., Chekulaev, D., Zerova, V., He, W., Canham, L., & Kaplan, A. (2018). Carrier dynamics and surface vibration-assisted Auger recombination in porous silicon. *Physical Review B*, 97(15). <https://doi.org/10.1103/physrevb.97.155203>
32. 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. <https://doi.org/10.1134/s1063782611010192>
33. Vambol, S., Bogdanov, I., Vambol, V., Suchikova, Y., Lopatina, H., & Tsybuliak, N. (2017). Research into effect of electrochemical etching conditions on the morphology of porous gallium arsenide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (90)), 22–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118725>
34. Schmuki, P., Fraser, J., Vitus, C. M., Graham, M. J., & Isaacs, H. S. (1996). Initiation and Formation of Porous GaAs. *Journal of The Electrochemical Society*, 143(10), 3316–3322. <https://doi.org/10.1149/1.1837204>
35. Oksanich, A. P., Pritchins, S. E., Kogdas, M. G., Kholod, A. G., & Shevchenko, I. V. (2019). Effect of Porous GaAs Layer Morphology on Pd/porous GaAs Schottky Contact. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 11(5), 05007–1–05007–5. [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(5\).05007](https://doi.org/10.21272/jnep.11(5).05007)
36. Ben Khalifa, S., Chebaane, S., & Beji, L. (2023). Optical and photoluminescence studies of CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles deposited on different substrates. *Optical and Quantum Electronics*, 55(5). <https://doi.org/10.1007/s11082-023-04737-5>
37. Lebib, A., Beji, L., & Hamdaoui, N. (2024). Investigation of n-ZnO/p-porous GaAs/p<sup>++</sup>-GaAs heterostructure for photodetection applications. *Optical and Quantum Electronics*, 56(4). <https://doi.org/10.1007/s11082-023-06256-9>

38. Buzynin, A. N., Buzynin, Y. N., Belyaev, A. V., Luk'yanov, A. E., & Rau, E. I. (2007). Growth and defects of GaAs and InGaAs films on porous GaAs substrates. *Thin Solid Films*, 515(10), 4445–4449. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.175>.

39. Ben Khalifa, S., Gruzza, B., Robert-Goumet, C., Bideux, L., Monier, G., Saidi, F., M'Ghaieth, R., Hjiri, M., Hamila, R., Hassen, F., Maaref, H., Bremond, G., & Bèji, L. (2007). Study of porous III–V semiconductors by electron spectroscopies (AES and XPS) and optical spectroscopy (PL): Effect of ionic bombardment and nitridation process. *Surface Science*, 601(18), 4531–4535. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2007.04.186>

40. Liang, C., Cheng, L., Zhang, S., Yang, S., Liu, W., Xie, J., Li, M.-D., Chai, Z., Wang, Y., & Wang, S. (2022). Boosting the Optoelectronic Performance by Regulating Exciton Behaviors in a Porous Semiconductive Metal–Organic Framework. *Journal of the American Chemical Society*, 144(5), 2189–2196. <https://doi.org/10.1021/jacs.1c11150>

41. Saghrouni, H., Missaoui, A., Hannachi, R., & Beji, L. (2013). Investigation of the optical and electrical properties of p-type porous GaAs structure. *Superlattices and Microstructures*, 64, 507–517. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.10.007>

42. Ashok, A., Vasanth, A., Nagaura, T., Eguchi, M., Motta, N., Phan, H., Nguyen, N., Shapter, J. G., Na, J., & Yamauchi, Y. (2022). Plasma-Induced Nanocrystalline Domain Engineering and Surface Passivation in Mesoporous Chalcogenide Semiconductor Thin Films. *Angewandte Chemie International Edition*, 61(14). <https://doi.org/10.1002/anie.202114729>

43. Flamand, G., & Poortmans, J. (2005). Porous GaAs as a possible antireflective coating and optical diffusor for III-V solar cells. *physica status solidi (a)*, 202(8), 1611–1615. <https://doi.org/10.1002/pssa.200461199>

44. Liu, R., Zheng, Z., Spurgeon, J., & Yang, X. (2014). Enhanced photoelectrochemical water-splitting performance of semiconductors by surface

passivation layers. *Energy Environ. Sci.*, 7(8), 2504–2517.  
<https://doi.org/10.1039/c4ee00450g>

45. Nichiporuk, O., Kaminski, A., Lemiti, M., Fave, A., Litvinenko, S., & Skryshevsky, V. (2006). Passivation of the surface of rear contact solar cells by porous silicon. *Thin Solid Films*, 511-512, 248–251.  
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.12.053>

46. Lu, W., Iwasa, Y., Ou, Y., Jinno, D., Kamiyama, S., Petersen, P. M., & Ou, H. (2017). Effective optimization of surface passivation on porous silicon carbide using atomic layer deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *RSC Advances*, 7(14), 8090–8097.  
<https://doi.org/10.1039/c6ra27281a>

47. Ali, N. K., Hashim, M. R., & Aziz, A. A. (2008). Effects of surface passivation in porous silicon as H<sub>2</sub> gas sensor. *Solid-State Electronics*, 52(7), 1071–1074. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2008.03.010>

48. Gavrillov, S. A., Belogorokhov, A. I., & Belogorokhova, L. I. (2002). A mechanism of oxygen-induced passivation of porous silicon in the HF: HCl: C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH solutions. *Semiconductors*, 36(1), 98–101.  
<https://doi.org/10.1134/1.1434521>

49. Aravind R., Pitale, S., Ghosh, M., Singh, S. G., Patra, G. D., & Sen, S. (2020). Stable native oxides formed on high purity germanium by chemical oxidation-A novel strategy for surface passivation. In *DAE SOLID STATE PHYSICS SYMPOSIUM 2019*. AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0017678>

50. von Bardeleben, H. J., Schoisswohl, M., & Cantin, J. L. (1996). Electron paramagnetic resonance study of defects in oxidized and nitrated porous Si and Si<sub>1-x</sub>Gex. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 115, 277–289. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(96\)03604-7](https://doi.org/10.1016/0927-7757(96)03604-7)

51. Suchikova, Y.; Kovachov, S.; Bohdanov, I. Formation of oxide crystallites on the porous GaAs surface by electrochemical deposition. *Nanomater. Nanotechnol.* 2022, 12, 184798042211273.  
<https://doi.org/10.1177/18479804221127307>

52. Stolyarova, S., El-Bahar, A., & Nemirovsky, Y. (2002). Unexpected room temperature growth of silicon dioxide crystallites on passivated porous silicon. *Journal of Crystal Growth*, 237-239, 1920–1925. [https://doi.org/10.1016/s0022-0248\(01\)02247-3](https://doi.org/10.1016/s0022-0248(01)02247-3)

53. Suchikova, Y.; Lazarenko, A.; Kovachov, S.; Usseinov, A.; Karipbaev, Z.; Popov, A.I. Formation of porous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs layers for electronic devices. In *Proceedings of the 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, February 2022; pp. 01-04. IEEE. <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766890>.

54. Steer, C. A., Weng, G. S., Luo, J. L., & Ivey, D. G. (2000). Formation of As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> during anodic dissolution of GaAs. *Electrochemistry Communications*, 2(11), 754–761. [https://doi.org/10.1016/s1388-2481\(00\)00116-8](https://doi.org/10.1016/s1388-2481(00)00116-8)

55. Feng, L., Zhang, L.-d., Liu, H., Gao, X., Miao, Z., Cheng, H.-c., Wang, L., & Niu, S. (2013). Characterization study of native oxides on GaAs(100) surface by XPS. In B. Chang & H. Guo (Eds.), *ISPDI 2013 - Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging*. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2033679>

56. Acikgoz, S., & Yungevis, H. (2022). Controlled electrochemical growth of micro-scaled As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxide structures on p-type gallium arsenide. *Applied Physics A*, 128(9). <https://doi.org/10.1007/s00339-022-05978-z>

57. Srivastava, S., & Flora, S. J. S. (2020). Arsenicals: toxicity, their use as chemical warfare agents, and possible remedial measures. In *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents* (pp. 303–319). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819090-6.00021-0>

58. Li, X., & Bohn, P. W. (2000). Arsenic Oxide Microcrystals in Anodically Processed GaAs Electrochemical Growth, Spectroscopy, and Morphology. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(5), 1740. <https://doi.org/10.1149/1.1393427>

59. Lockwood, D. J. (2000). Raman Spectroscopy of Oxides of GaAs Formed in Solution. *Journal of Solution Chemistry*, 29(10), 1039–1046. <https://doi.org/10.1023/a:1005199104055>
60. Jiménez, I., Moreno, M., Martín-Gago, J. A., Asensio, M. C., & Sacedón, J. L. (1994). GaAs formation by reduction of As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at SiO<sub>2</sub>/GaAs oxides/GaAs interfaces. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 12(4), 1170–1175. <https://doi.org/10.1116/1.579290>
61. Quagliano, L. G. (2000). Detection of As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> arsenic oxide on GaAs surface by Raman scattering. *Applied Surface Science*, 153(4), 240–244. [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(99\)00355-4](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(99)00355-4)
62. Blakemore, J. S. (1982). Semiconducting and other major properties of gallium arsenide. *Journal of Applied Physics*, 53(10), R123—R181. <https://doi.org/10.1063/1.331665>
63. Papatheodorou, G. N., & Solin, S. A. (1976). Vibrational excitations of As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. I. Disordered phases. *Physical Review B*, 13(4), 1741–1751. <https://doi.org/10.1103/physrevb.13.1741>
64. Zhao, S., Liao, Y., Xie, X., Wang, Y., & Sun, Z. (2022). As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> removal from coal-fired flue gas by the carbon-based adsorbent: Effects of adsorption temperature and flue gas components. *Chemical Engineering Journal*, 450, 138023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138023>
65. Kayan, A., Tarcan, E., Kadiroglu, U., & Esmer, K. (2004). Electrical and dielectrical properties of the MnO<sub>2</sub> doped with As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SnO. *Materials Letters*, 58(16), 2170–2174. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.01.018>
66. Flora, S. J. S. (2000). Possible Health Hazards Associated with the Use of Toxic Metals in Semiconductor Industries. *Journal of Occupational Health*, 42(3), 105–110. <https://doi.org/10.1539/joh.42.105>
67. Che, J., Zhang, W., Asselin, E., Deen, K. M., Feng, S., Chen, Y., & Wang, C. (2024). Green Route to Arsenic Detoxification: Mechanochemical Transformation of As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to As(0). *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c08074>

68. Rath, S., Jema, J. P., Kesavan, K., Mallick, S., Pradhan, J., Chainy, G. B. N., Nayak, D., Kaushik, S., & Dandapat, J. (2024). Arsenic album 30C exhibits crystalline nano structure of arsenic trioxide and modulates innate immune markers in murine macrophage cell lines. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51319-w>
69. Babeer, A. M., Amin, H. Y., Sayyed, M. I., Mahmoud, A. E.-r., & Sadeq, M. S. (2023). Impact of the As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio on the structure and optical features of As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–NiO–Na<sub>2</sub>O–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.12.176>
70. Wilhelm, A. A., Lucas, P., DeRosa, D. L., & Riley, M. R. (2007). Biocompatibility of Te–As–Se glass fibers for cell-based bio-optic infrared sensors. *Journal of Materials Research*, 22(4), 1098–1104. <https://doi.org/10.1557/jmr.2007.0127>
71. Chellu, A., Koivusalo, E., Raappana, M., Ranta, S., Polojärvi, V., Tukiainen, A., Lahtonen, K., Saari, J., Valden, M., Seppänen, H., Lipsanen, H., Guina, M., & Hakkarainen, T. (2020). GaAs surface passivation for InAs/GaAs quantum dot based nanophotonic devices. *Nanotechnology*. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abd0b4>
72. Manna, S., Huang, H., da Silva, S. F. C., Schimpf, C., Rota, M. B., Lehner, B., Reindl, M., Trotta, R., & Rastelli, A. (2020). Surface passivation and oxide encapsulation to improve optical properties of a single GaAs quantum dot close to the surface. *Applied Surface Science*, 532, 147360. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147360>
73. Laukkanen, P., Punkkinen, M. P. J., Kuzmin, M., Kokko, K., Lång, J., & Wallace, R. M. (2021). Passivation of III–V surfaces with crystalline oxidation. *Applied Physics Reviews*, 8(1), 011309. <https://doi.org/10.1063/1.5126629>
74. Hasan, M. N., Zheng, Y., Lai, J., Swinnich, E., Licata, O. G., Baboli, M. A., Mazumder, B., Mohseni, P. K., & Seo, J. (2022). Influences of Native Oxide on the Properties of Ultrathin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -Interfaced Si/GaAs Heterojunctions. *Advanced Materials Interfaces*, 2101531. <https://doi.org/10.1002/admi.202101531>