

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.

**ВОЛОГИЙ ХІМІЧНИЙ СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР ALXGA1–XAS:
ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ПОЯСНЕННЯ МЕХАНІЗМІВ РОСТУ**

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: Олександр ОНІСЬКО

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

Рецензент: д.техн.н., професор Яна СИЧІКОВА

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Онисько Олександр Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Вологий хімічний синтез наноструктур AlGaAs: дослідження властивостей і пояснення механізмів росту»

Керівник роботи: Жидачевський Я.А., 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: розробка оптимальних умов мокрого хімічного синтезу для отримання наноструктур Al_xGa_{1-x}As із заданими властивостями та пояснення механізму їхнього росту

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

- розробити методику мокрого хімічного синтезу плівок Al_xGa_{1-x}As із використанням електрохімічного осадження та травлення;
- дослідити вплив різних режимів напруги на морфологію, склад і структуру плівок;
- вивчити вплив текстурованої підкладки GaAs на механізми росту плівок;
- оцінити морфологічні характеристики плівок за допомогою SEM та визначити хімічний склад методом EDX;
- дослідити кристалічну структуру плівок Al_xGa_{1-x}As за допомогою XRD-аналізу;
- проаналізувати вплив умов синтезу на спектральні характеристики матеріалів за допомогою раманівської спектроскопії.

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)

Олександр ОНІСЬКО

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи:

(підпис)

Ярослав ЖИДАЧЕВСЬКИЙ

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.	3
РОЗДІЛ 1. Огляд поточної ситуації.	6
РОЗДІЛ 2. Матеріали і методи.	10
РОЗДІЛ 3. Вологий хімічний синтез наноструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$: дослідження властивостей і пояснення механізмів росту.	17
ВИСНОВКИ.	37
Перелік використаних джерел.	38

ВСТУП

Стрімкий розвиток електроніки та фотоніки вимагає створення нових матеріалів, здатних забезпечити ефективність і надійність сучасних пристроїв. Традиційні методи синтезу напівпровідників, такі як молекулярно-променева епітаксія та хімічне осадження з парової фази, залишаються дорогими та технологічно складними. У цьому контексті мокрий хімічний синтез, зокрема електрохімічне осадження, пропонує економічно ефективну альтернативу для отримання високоякісних плівок і наноструктур.

Серед перспективних матеріалів для оптоелектроніки та фотоелементів виділяються потрійні сполуки $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, які забезпечують широкий спектр електронних і оптичних властивостей завдяки можливості регулювання складу. Унікальні характеристики цих матеріалів, такі як висока термічна стабільність, хімічна стійкість і здатність до точного налаштування ширини забороненої зони, роблять їх універсальними для застосувань від світлодіодів і лазерів до сонячних батарей.

Однак ефективне впровадження $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ у пристрої вимагає вдосконалення методів їх синтезу. Зокрема, текстурування підкладок і варіювання умов осадження дозволяють контролювати морфологію, структурні та хімічні характеристики плівок. Ця робота спрямована на дослідження механізмів росту наноструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ у різних електрохімічних режимах, а також на встановлення зв'язку між параметрами осадження та властивостями отриманих матеріалів.

Об'єкт дослідження: Наноструктури на основі потрійних сполук $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, синтезовані методом мокрого електрохімічного осадження.

Предмет дослідження: Вплив умов мокрого хімічного синтезу, включаючи режими напруги, параметри осадження та текстурування

підкладки, на морфологічні, електронні та оптичні властивості плівок $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Мета дослідження:

Розробити оптимальні умови мокрого хімічного синтезу для отримання наноструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ із заданими властивостями та зрозуміти механізми їхнього росту.

Завдання дослідження

1. Розробити методику мокрого хімічного синтезу плівок $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ із використанням електрохімічного осадження та травлення.
2. Дослідити вплив різних режимів напруги на морфологію, склад і структуру плівок.
3. Вивчити вплив текстурованої підкладки GaAs на механізми росту плівок.
4. Оцінити морфологічні характеристики плівок за допомогою SEM та визначити хімічний склад методом EDX.
5. Дослідити кристалічну структуру плівок $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ за допомогою XRD-аналізу.
6. Проаналізувати вплив умов синтезу на спектральні характеристики матеріалів за допомогою раманівської спектроскопії.

Наукова новизна

1. Встановлено вплив режимів напруги на механізми росту плівок $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, включаючи механізми Фольмера-Вебера та Странського-Крастанова, та їхню адаптацію для текстурованих підкладок.
2. Показано, що текстурування поверхні підкладки GaAs значно впливає на зародження центрів росту, що дозволяє отримувати різні морфології, включаючи квіткоподібні та пористі структури.

3. Вперше продемонстровано кореляцію між режимами напруги та кристалічною структурою плівок $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, підтверджену XRD та раманівською спектроскопією.

4. Розроблено універсальну методику налаштування вмісту алюмінію (параметр x), що дозволяє точний контроль ширини забороненої зони.

Практична значимість

1. Запропонована методика мокрого хімічного синтезу є економічно ефективною та придатною для масштабованого виробництва плівок $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

2. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації матеріалів у таких областях, як оптоелектроніка (світлодіоди, лазери), фотоелементи (сонячні батареї) та сенсорні технології.

3. Розроблені механізми регулювання морфології та складу плівок сприятимуть створенню високоефективних пристроїв із заданими характеристиками.

4. Технологія є перспективною для промислового впровадження, особливо для екологічно безпечних та дешевших заміників традиційних напівпровідників.

ВИСНОВКИ

1. Досліджено вплив умов синтезу на механізми росту плівок. Режими напруги визначають механізми росту: перемикання напруги сприяє режиму Фольмера-Вебера з утворенням голчастих структур, тоді як поступове підвищення напруги та пульсуючий режим забезпечують гібридний ріст за механізмом Странського-Крастанова із формуванням квіткоподібних і пористих структур.

2. Встановлено роль текстурованих підкладок. Електрохімічне травлення GaAs створює численні центри зародження, що сприяють рівномірному росту та покращенню адгезії шарів $Al_xGa_{1-x}As$, мінімізуючи дефекти інтерфейсу та внутрішні напруги.

3. Проаналізовано морфологію та склад плівок. Методи SEM і EDX показали, що морфологія зразків варіюється від хаотичних мереж до квіткоподібних і щільно пористих структур, а вміст алюмінію залежить від умов синтезу, зокрема режимів напруги.

4. Проведено структурний аналіз. XRD-аналіз підтвердив систематичні зрушення піків із підвищенням вмісту алюмінію, а раманівська спектроскопія виявила покращення кристалічної якості зі зменшенням дефектів у зразках, синтезованих у поступових і пульсуючих режимах.

5. Запропоновано рекомендації для синтезу $Al_xGa_{1-x}As$. Мокрий хімічний синтез із варіюванням умов напруги є ефективним підходом для створення плівок із заданими морфологічними, електронними та оптичними властивостями. Оптимізація параметрів осадження забезпечує потенціал застосування $Al_xGa_{1-x}As$ у сучасних оптоелектронних та енергетичних пристроях.

Таким чином, результати цього дослідження підкреслюють універсальність мокрого хімічного синтезу для створення наноструктур $Al_xGa_{1-x}As$ і відкривають перспективи для подальшого вдосконалення технологій синтезу в напівпровідниковій промисловості.

Перелік використаних джерел

1. Yu, Weili, Feng Li, Tao Huang, Wei Li, and Tom Wu. "Go beyond the limit: Rationally designed mixed-dimensional perovskite/semiconductor heterostructures and their applications." *Innovation*, December 2022, 100363. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2022.100363>.
2. An, Qin, Teyang Zhang, Fei Chen, and Weitao Su. "Recent progress in synthesis and physical properties of 2D ternary TMDC-based vertical heterostructures." *CrystEngComm*, 2023. <https://doi.org/10.1039/d3ce00562c>.
3. Karipbayev, Zhakyp T., Kuat Kumarbekov, Ilze Manika, Alma Dautbekova, Artem L. Kozlovskiy, Dmitro Sugak, Sergei B. Ubizskii, Abdirash Akilbekov, Yana Suchikova, and Anatoli I. Popov. "Optical, Structural, and Mechanical Properties of Gd₃Ga₅O₁₂ Single Crystals Irradiated with 84 Kr⁺ Ions." *physica status solidi (b)*, January 29, 2022, 2100415. <https://doi.org/10.1002/pssb.202100415>.
4. Kovachov, Sergii, Ihor Bohdanov, Zhakyp Karipbayev, Yana Suchikova, Tamara Tsebriienko, and Anatoli I. Popov. "Layer-by-Layer Synthesis and Analysis of the the Phase Composition of Cdx TeyOz/CdS/por-ZnO/ZnO Heterostructure." In *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. IEEE, 2022. <https://doi.org/10.1109/khpiweek57572.2022.9916492>
5. Ra, Hyun-Soo, Sang-Hyeon Lee, Seock-Jin Jeong, Sinyoung Cho, and Jong-Soo Lee. "Advances in Heterostructures for Optoelectronic Devices: Materials, Properties, Conduction Mechanisms, Device Applications." *Small Methods*, June 17, 2023. <https://doi.org/10.1002/smt.202300245>
6. Lyu, Wenhao, Jiayi An, Yucheng Lin, Pengtianyu Qiu, Guangyu Wang, Jiale Chao, and Bo Fu. "Fabrication and Applications of Heterostructure Materials for Broadband Ultrafast Photonics." *Advanced Optical Materials*, March 31, 2023. <https://doi.org/10.1002/adom.202300124>
7. Sredenschek, A.J., Sanchez, D.E., Wang, J. et al. Heterostructures coupling ultrathin metal carbides and chalcogenides. *Nat. Mater.* 23, 460–469 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01827-x>

8. Li, Xin, Sikandar Aftab, Aumber Abbas, Sajjad Hussain, Muhammad Aslam, Fahmid Kabir, Hisham S. M. Abd-Rabboh, H. H. Hegazy, Fan Xu, and M. Z. Ansari. "Advances in Mixed 2D and 3D Perovskite Heterostructure Solar Cells: A Comprehensive Review." *Nano Energy*, October 2023, 108979. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108979>

9. Suchikova, Y., Kovachov, S., Bohdanov, I. et al. Study of the structural and morphological characteristics of the Cd_xTeyOz nanocomposite obtained on the surface of the CdS/ZnO heterostructure by the SILAR method. *Appl. Phys. A* 129, 499 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06776-x>

10. Riffat, Mamoona, Hassan Ali, H. A. Qayyum, M. Bilal, and Tanvir Hussain. "Enhanced solar-driven water splitting by ZnO/CdTe heterostructure thin films-based photocatalysts." *International Journal of Hydrogen Energy*, March 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.068>

11. Suchikova, Y.; Kovachov, S.; Bohdanov, I.; Karipbayev, Z.T.; Zhydachevskyy, Y.; Lysak, A.; Pankratov, V.; Popov, A.I. Advanced Synthesis and Characterization of CdO/CdS/ZnO Heterostructures for Solar Energy Applications. *Materials* 2024, 17, 1566. <https://doi.org/10.3390/ma17071566>

12. Cheng, Zhang, Yuelei Wang, Ruxin Zheng, and Weihua Mu. "The prediction of two-dimensional PbN: opened bandgap in heterostructure with CdO." *Frontiers in Chemistry* 12 (April 18, 2024). <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1382850>

13. Kumar, Arvind Shankar, Mingyuan Wang, Yancheng Li, Ryuji Fujita, and Xuan P. A. Gao. "Interfacial Charge Transfer and Gate-Induced Hysteresis in Monochalcogenide InSe/GaSe Heterostructures." *ACS Applied Materials & Interfaces* 12, no. 41 (September 21, 2020): 46854–61. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c09635>

14. Kovachov, S. S., K. M. Tikhovod, M. V. Kalenyk, I. T. Bohdanov, and Ya O. Sychikova. "Non-Vacuum Design of CuGa_xIn_{1-x}Se₂ Films for Solar Energy Applications." *METALLOFIZIKA I NOVEISHIE*

TEKHNOLOGII 45, no. 5 (December 25, 2023): 593–602.
<https://doi.org/10.15407/mfint.45.05.0593>.

15. Suchikova, Y.; Kovachov, S.; Bohdanov, I.; Popova, E.; Moskina, A.; Popov, A. Characterization of Cd_xTeyOz/CdS/ZnO Heterostructures Synthesized by the SILAR Method. *Coatings* 2023, 13, 639.
<https://doi.org/10.3390/coatings13030639>

16. Khrypunov, Gennady, Serg Vambol, Natalya Deyneko, and Yana Sychikova. "Increasing the efficiency of film solar cells based on cadmium telluride." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 6, no. 5 (84) (December 27, 2016): 12–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85617>

17. Wang, Yuxuan, Chun Wang, Yanyan Xu, and Yaqiu Sun. "Fabrication of novel Ag-doped ZnO/CdO heterostructure for high-sensitive detection of formaldehyde at low temperature." *Materials Letters*, July 2023, 134852.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134852>

18. Liu, Sanmei, Weiming Xiao, Caiju Jin, Siyao Xia, Wen Wang, Xin Jiang, Luyao Li, Shuhua Wang, and Chao Chen. "MOFs derived CdS/CdO heterojunction photoanode for high-efficient water splitting." *Applied Surface Science*, September 2022, 154697. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154697>

19. Bothe, K., G. H. Bauer, and T. Unold. "Spatially resolved photoluminescence measurements on Cu(In,Ga)Se₂ thin films." *Thin Solid Films* 403-404 (February 2002): 453–56. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(01\)01541-3](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(01)01541-3)

20. Ibragimova, S.I., Guseinov, G.G., Ragimov, S.S. et al. Crystal Structure and Some Physical Properties of CuGaIn₂Se₅. *Crystallogr. Rep.* 64, 883–886 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1063774519060075>

21. Hoffmann, Winfried, and Thomas Pellkofer. "Thin films in photovoltaics: Technologies and perspectives." *Thin Solid Films* 520, no. 12 (April 2012): 4094–100. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.04.146>

22. Romeo, A.; Artegiani, E. CdTe-Based Thin Film Solar Cells: Past, Present and Future. *Energies* 2021, 14, 1684. <https://doi.org/10.3390/en14061684>

23. Genchi, G.; Sinicropi, M.S.; Lauria, G.; Carocci, A.; Catalano, A. The Effects of Cadmium Toxicity. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>

24. Abiodun Daramola, Olamide, Justin Bazibuhe Safari, Kayode Omotayo Adeniyi, Xavier Siwe-Noundou, Laura Margaret Kirkpatrick Dingle, Adrienne Lesley Edkins, Potlaki Foster Tseki, and Rui Werner Maçedo Krause. "Biocompatible liposome and chitosan-coated CdTe/CdSe/ZnSe multi-core-multi-shell fluorescent nanoprobe for biomedical applications." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, April 2024, 115714. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.115714>.

25. Hu, Liang, Hui Zhong, and Zhiguo He. "Toxicity evaluation of cadmium-containing quantum dots: A review of optimizing physicochemical properties to diminish toxicity." *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 200 (April 2021): 111609. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.111609>

26. Fthenakis, Vasilis, Clement Athias, Alyssa Blumenthal, Aylin Kulur, Julia Magliozzo, and David Ng. "Sustainability evaluation of CdTe PV: An update." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 123 (May 2020): 109776. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109776>

27. Li, Yu, Jiawei Zhang, Qingguo Chen, Xinhui Xia, and Minghua Chen. "Emerging of Heterostructure Materials in Energy Storage: A Review." *Advanced Materials* 33, no. 27 (May 25, 2021): 2100855. <https://doi.org/10.1002/adma.202100855>

28. Sunny, Fency, Subila K B, and Nandakumar Kalarikkal. "An Overview on Lead Halide Perovskite based Composites and Heterostructures: Synthesis and Applications." *ChemNanoMat*, December 12, 2023. <https://doi.org/10.1002/cnma.202300484>

29. Wu, Xu, Qiong Yan, Hao Wang, Deyu Wu, Heng Zhou, Hui Li, Song Yang, Tianyi Ma, and Heng Zhang. "Heterostructured Catalytic Materials as Advanced Electrocatalysts: Classification, Synthesis, Characterization, and

Application." *Advanced Functional Materials*, May 6, 2024.
<https://doi.org/10.1002/adfm.202404535>

30. Acar, Gizem, Lucie Leguay, Samuel Jones, Peter Hodgson, Andrei Schliwa, and Manus Hayne. "Towards GaSb/GaAs quantum-ring single-photon LEDs: recent progress and prospects." In *Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XXVIII*, edited by Martin Strassburg, Jong Kyu Kim, and Michael R. Krames. SPIE, 2024. <https://doi.org/10.1117/12.3002881>

31. Lv, Zhisheng, Lei Liu, Xingyue Zhangyang, Feifei Lu, and Jian Tian. "Comprehensive study on the optical properties of graded Al component Al_xGa_{1-x}n nanostructures for UV photocathode." *Superlattices and Microstructures* 147 (November 2020): 106695. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106695>

32. Makadsi, Matti N. "Recent progress in epitaxial growth: GaAs, a-GaAs:H and a-Al_xGa_{1-x}As:H prepared by thermal and flash evaporation." *Renewable Energy* 28, no. 2 (February 2003): 155–69. [https://doi.org/10.1016/s0960-1481\(02\)00029-0](https://doi.org/10.1016/s0960-1481(02)00029-0)

33. Manfra, Michael J. "Molecular Beam Epitaxy of Ultra-High-Quality AlGaAs/GaAs Heterostructures: Enabling Physics in Low-Dimensional Electronic Systems." *Annual Review of Condensed Matter Physics* 5, no. 1 (March 2014): 347–73. <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031113-133905>

34. Suchikova, Y.; Kovachov, S.; Bohdanov, I.; Abdikadirova, A.A.; Kenzhina, I.; Popov, A.I. Electrochemical Growth and Structural Study of the Al_xGa_{1-x}As Nanowhisker Layer on the GaAs Surface. *J. Manuf. Mater. Process.* 2023, 7, 153. <https://doi.org/10.3390/jmmp7050153>

35. Koblmüller, Gregor, Benedikt Mayer, Thomas Stettner, Gerhard Abstreiter, and Jonathan J. Finley. "GaAs–AlGaAs core–shell nanowire lasers on silicon: invited review." *Semiconductor Science and Technology* 32, no. 5 (April 4, 2017): 053001. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aa5e45>

36. Masselink, W. T., Y. C. Chang, H. Morkoç, D. C. Reynolds, C. W. Litton, K. K. Bajaj, and P. W. Yu. "Shallow impurity levels in AlGaAs/GaAs

semiconductor quantum wells." *Solid-State Electronics* 29, no. 2 (February 1986): 205–14. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(86\)90041-9](https://doi.org/10.1016/0038-1101(86)90041-9)

37. Missous, M. "Stoichiometric low temperature (SLT) GaAs and AlGaAs grown by molecular beam epitaxy." *Microelectronics Journal* 27, no. 4-5 (July 1996): 393–409. [https://doi.org/10.1016/0026-2692\(95\)00064-x](https://doi.org/10.1016/0026-2692(95)00064-x)

38. Ueda, Osamu. "Reliability issues in III–V compound semiconductor devices: optical devices and GaAs-based HBTs." *Microelectronics Reliability* 39, no. 12 (December 1999): 1839–55. [https://doi.org/10.1016/s0026-2714\(99\)00193-6](https://doi.org/10.1016/s0026-2714(99)00193-6)

39. Colter, P.; Hagar, B.; Bedair, S. Tunnel Junctions for III-V Multijunction Solar Cells Review. *Crystals* 2018, 8, 445. <https://doi.org/10.3390/cryst8120445>

40. Hansen, W. (1988). Quasi-One-Dimensional electron systems on GaAs/AlGaAs heterojunctions. In: Rössler, U. (eds) *Festkörperprobleme 28. Advances in Solid State Physics*, vol 28. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0107851>

41. Kukushkin, I., Timofeev, V., von Klitzing, K., Ploog, K. (1988). Magneto-optics of two-dimensional electrons under the conditions of integral and fractional quantum hall effect in Si-MOSFETs and GaAs-AlGaAs single heterojunctions. In: Rössler, U. (eds) *Festkörperprobleme 28. Advances in Solid State Physics*, vol 28. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0107846>

42. Samanta, Swagata. "GaAs-based resonant tunneling diode: Device aspects from design, manufacturing, characterization and applications." *Journal of Semiconductors* 44, no. 10 (October 1, 2023): 103101. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/44/10/103101>

43. Suchikova, Yana. "Provision of environmental safety through the use of porous semiconductors for solar energy sector." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 6, no. 5 (84) (December 27, 2016): 26–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85848>.

44. Mittal, Vinita, Goran Z. Mashanovich, and James S. Wilkinson. "Perspective on Thin Film Waveguides for on-Chip Mid-Infrared Spectroscopy of Liquid Biochemical Analytes." *Analytical Chemistry* 92, no. 16 (July 13, 2020): 10891–901. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01296>
45. Yamaguchi, Masafumi, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, and Yoshio Ohshita. "Overview and Loss Analysis of High-Efficiency III-V Compound Single-Junction Solar Cells." In *2020 IEEE 47th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/pvsc45281.2020.9300850>
46. Esame, Onur, Yasar Gurbuz, Ibrahim Tekin, and Ayhan Bozkurt. "Performance comparison of state-of-the-art heterojunction bipolar devices (HBT) based on AlGaAs/GaAs, Si/SiGe and InGaAs/InP." *Microelectronics Journal* 35, no. 11 (November 2004): 901–8. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2004.07.003>
47. Chou, Y. C., D. Leung, R. Grundbacher, R. Lai, Q. Kan, P. H. Liu, D. Eng, T. Block, and A. Oki. "Gate metal interdiffusion induced degradation in space-qualified GaAs PHEMTs." *Microelectronics Reliability* 46, no. 1 (January 2006): 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2005.02.012>
48. Li, J., A. Aierken, Y. Liu, Y. Zhuang, X. Yang, J. H. Mo, R. K. Fan, et al. "A Brief Review of High Efficiency III-V Solar Cells for Space Application." *Frontiers in Physics* 8 (February 2, 2021). <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.631925>
49. Nanishi, Yasushi, and Tomohiro Yamaguchi. "Plasma-excited MBE—proposal and achievements through R&D of compound semiconductor materials and devices." *Japanese Journal of Applied Physics* 61, SA (January 1, 2022): SA0810. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac3d0c>
50. Mawst, Luke J., Honghyuk Kim, Gary Smith, Wei Sun, and Nelson Tansu. "Strained-layer quantum well materials grown by MOCVD for diode laser application." *Progress in Quantum Electronics*, November 2020, 100303. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2020.100303>
51. Wang, B.; Zeng, Y.; Song, Y.; Wang, Y.; Liang, L.; Qin, L.; Zhang, J.; Jia, P.; Lei, Y.; Qiu, C.; et al. *Principles of Selective Area Epitaxy and*

Applications in III–V Semiconductor Lasers Using MOCVD: A Review. *Crystals* 2022, 12, 1011. <https://doi.org/10.3390/cryst12071011>

52. Hoang, Anh Tuan, Kairui Qu, Xiang Chen, and Jong-Hyun Ahn. "Large-area synthesis of transition metal dichalcogenides via CVD and solution-based approaches and their device applications." *Nanoscale*, 2021. <https://doi.org/10.1039/d0nr08071c>

53. Suchikova, Yianna, Valery Kidalov, and Georgiy Sukach. "Blue Shift of Photoluminescence Spectrum of Porous InP." *ECS Transactions* 25, no. 24 (December 17, 2019): 59–64. <https://doi.org/10.1149/1.3316113>

54. Althomali, Raed H., and Waheed A. Adeosun. "Wet chemically synthesized metal oxides nanoparticles, characterization and application in electrochemical energy storage: An updated review." *Synthetic Metals* 298 (September 2023): 117424. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2023.117424>

55. Liu, Wei, Hongxiu Zhang, Chuanming Li, Xin Wang, Jingquan Liu, and Xingwang Zhang. "Non-noble metal single-atom catalysts prepared by wet chemical method and their applications in electrochemical water splitting." *Journal of Energy Chemistry* 47 (August 2020): 333–45. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.02.020>

56. Suchikova, Y. O., S. S. Kovachov, A. S. Lazarenko, I. O. Bardus, K. Tikhovod, O. I. Hurenko, and I. T. Bohdanov. "Oxidation of the n-GaAs Surface: Morphological and Kinetic Analysis." *Journal of Nano- and Electronic Physics* 14, no. 3 (2022): 03033–1. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(3\).03033](https://doi.org/10.21272/jnep.14(3).03033)

57. Kovachov, S., I. Bohdanov, I. Bardus, D. Drozhcha, K. Tikhovod, A. Khrekin, V. Bondarenko, I. Kosogov, and Y. Suchikova. "About synthesis mechanism of periodic oxide nanocrystallites on surface of single-crystal InP." *Physics and Chemistry of Solid State* 24, no. 1 (March 21, 2023): 159–65. <https://doi.org/10.15330/pcss.24.1.159-165>

58. Gao, Dunfeng, Hefei Li, Pengfei Wei, Yi Wang, Guoxiong Wang, and Xinhe Bao. "Electrochemical synthesis of catalytic materials for energy catalysis."

Chinese Journal of Catalysis 43, no. 4 (April 2022): 1001–16.
[https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(21\)63940-2](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(21)63940-2)

59. Sychikova, Ya A., V. V. Kidalov, and G. A. Sukach. "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, no. 4 (July 2013): 626–30.
<https://doi.org/10.1134/s1027451013030130>.

60. Zhang, Xuan, Kai Wan, Palaniappan Subramanian, Maowen Xu, Jiangshui Luo, and Jan Fransaer. "Electrochemical deposition of metal–organic framework films and their applications." *Journal of Materials Chemistry A* 8, no. 16 (2020): 7569–87. <https://doi.org/10.1039/d0ta00406e>.

61. Liu, Liang, and Daniel Mandler. "Using nanomaterials as building blocks for electrochemical deposition: A mini review." *Electrochemistry Communications* 120 (November 2020): 106830.
<https://doi.org/10.1016/j.elecom.2020.106830>

62. Suchikova, Yana, Andriy Lazarenko, Sergii Kovachov, Abay Usseinov, Zhakyp Karipbaev, and Anatoli 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)*. IEEE, 2022.
<https://doi.org/10.1109/tcset55632.2022.9766890>

63. Sebastián-Pascual, Paula, Inês Jordão Pereira, and María Escudero-Escribano. "Tailored electrocatalysts by controlled electrochemical deposition and surface nanostructuring." *Chemical Communications* 56, no. 87 (2020): 13261–72.
<https://doi.org/10.1039/d0cc06099b>

64. Mariella Babu, Ann, and Anitha Varghese. "Electrochemical deposition for metal organic Frameworks: Advanced Energy, Catalysis, sensing and separation applications." *Journal of Electroanalytical Chemistry* 937 (May 2023): 117417. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117417>.

65. Bernal, Miguel, Daniel Torres, Sorour Semsari Parapari, Miran Čeh, Kristina Žužek Rožman, Sašo Šturm, and Jon Ustarroz. "A microscopic view on the electrochemical deposition and dissolution of Au with Scanning Electrochemical Cell Microscopy – Part I." *Electrochimica Acta*, February 2023, 142023. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142023>

66. Suchikova, Yana, Sergii Kovachov, and Ihor Bohdanov. "Formation of oxide crystallites on the porous GaAs surface by electrochemical deposition." *Nanomaterials and Nanotechnology* 12 (January 2022): 184798042211273. <https://doi.org/10.1177/18479804221127307>

67. Liu, Qing-feng, Zhaozheng Meng, Dongshuai Hou, Yu Zhou, Yuxin Cai, Mingzhong Zhang, and Vivian W. Y. Tam. "Numerical modelling of electrochemical deposition techniques for healing concrete damaged by alkali silica reaction." *Engineering Fracture Mechanics*, September 2022, 108765. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108765>

68. Amit, E., Dery, L., Dery, S. et al. Electrochemical deposition of N-heterocyclic carbene monolayers on metal surfaces. *Nat Commun* 11, 5714 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19500-7>

69. Suchikova, Y. O., I. T. Bogdanov, and S. S. Kovachov. "Oxide crystals on the surface of porous indium phosphide." *Archives of Materials Science and Engineering* 2, no. 98 (August 1, 2019): 49–56. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.4606>.

70. Vambol, S. O., I. T. Bohdanov, V. V. Vambol, Y. O. Suchikova, O. M. Kondratenko, T. P. Nestorenko, and S. V. Onyschenko. "Formation of Filamentary Structures of Oxide on the Surface of Monocrystalline Gallium Arsenide." *Journal of Nano- and Electronic Physics* 9, no. 6 (2017): 06016–1. [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(6\).06016](https://doi.org/10.21272/jnep.9(6).06016)

71. Tenwar, Ankit Kumar, Sadhna Singh, D. V. Prashant, and Dip Prakash Samajdar. "Investigation of the Optoelectronic Performance of GaAs Nanostructures Solar Cell Applications." *Materials Today Communications*, October 2022, 104593. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104593>.

72. Prashant, D. V., Suneet Kumar Agnihotri, Sagar Bhattarai, Rahul Pandey, Jaya Madan, M. Khalid Hossain, and Dip Prakash Samajdar. "Systematic Investigation of the Optoelectronic Properties of GaAs Nanowire and Nanocone Solar Cells: Effect of Geometrical Nonuniformities, Angle of Incidence, and Structural and Electronic Parameters." *ACS Applied Electronic Materials*, August 18, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.3c00657>

73. Al-Abri, Ruqaiya, Hoyeon Choi, and Patrick Parkinson. "Measuring, controlling and exploiting heterogeneity in optoelectronic nanowires." *Journal of Physics: Photonics* 3, no. 2 (February 24, 2021): 022004. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/abe282>

74. Strassner, Johannes, Johannes Richter, Thomas Loeber, Christoph Doering, and Henning Fouckhardt. "Epitaxial Growth of Optoelectronically Active Ga(As)Sb Quantum Dots on Al-Rich AlGaAs with GaAs Capsule Layers." *Advances in Materials Science and Engineering 2021* (May 19, 2021): 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/8862946>

75. He, Yuan, Yubing Tao, Zihan Liu, and Qing Huang. "Design and optimization of nanostructure antireflection film for thin GaAs solar cells based on the photoelectrical coupling model." *Applied Energy* 364 (June 2024): 123184. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123184>

76. Singh, Sadhna, Indranil Mal, Dip Prakash Samajdar, and Koushik Dutta. "Geometrical Optimization of Gallium Arsenide (GaAs) nanostructure based Solar Cells." *Materials Today: Proceedings*, February 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.178>

77. Romeira, Bruno, Jérôme Borme, Hélder Fonseca, João Gaspar, and Jana B. Nieder. "Efficient light extraction in subwavelength GaAs/AlGaAs nanopillars for nanoscale light-emitting devices." *Optics Express* 28, no. 22 (October 12, 2020): 32302. <https://doi.org/10.1364/oe.402887>

78. Hameed, Z.A.A., Mutlak, F.AH. Study the Effect of Changing the Etching Current in a Si Nanostructure to Improve the Spectral Sensitivity of the

Detector. *Plasmonics* 19, 417–428 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11468-023-01984-w>

79. Krotkus, A., I. Nevinskas, R. Norkus, A. Geižutis, V. Strazdienė, V. Pačebutas, and T. Paulauskas. "Terahertz photocurrent spectrum analysis of AlGaAs/GaAs/GaAsBi multi-junction solar cells." *Journal of Physics D: Applied Physics* 56, no. 35 (June 2, 2023): 355109. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acd85d>

80. Verma, Arjit, and Abhijit Pethe. "Modelling and Analysis of Multi-Junction Photovoltaic Cells." In 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON). IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/indicon49873.2020.9342293>

81. Bhojan, Vidhya, and Anju Sebastian. "Construction of visible-light photocatalysts through bandgap engineering." In *Advanced Functional Materials and Methods for Photodegradation of Toxic Pollutants*, 63–84. Elsevier, 2024. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95953-7.00003-5>

82. Wang, Guojing, Shasha Lv, Yuanhua Shen, Wei Li, Linhan Lin, and Zhengcao Li. "Advancements in heterojunction, cocatalyst, defect and morphology engineering of semiconductor oxide photocatalysts." *Journal of Materiomics*, July 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2023.05.014>

83. Kuntysi, Orest, Galyna Zozulya, and Mariana Shepida. "Porous Silicon Formation by Electrochemical Etching." *Advances in Materials Science and Engineering* 2022 (May 27, 2022): 1–15. <https://doi.org/10.1155/2022/1482877>.

84. Monaico, E.I.; Monaico, E.V.; Ursaki, V.V.; Tiginyanu, I.M. Controlled Electroplating of Noble Metals on III-V Semiconductor Nanotemplates Fabricated by Anodic Etching of Bulk Substrates. *Coatings* 2022, 12, 1521. <https://doi.org/10.3390/coatings12101521>

85. Calamiotou, M., Y. S. Raptis, E. Anastassakis, M. Lagadas, and Z. Hatzopoulos. "XRD and Raman studies of low-temperature-grown GaAs epilayers." *Solid State Communications* 87, no. 6 (August 1993): 563–66. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(93\)90597-g](https://doi.org/10.1016/0038-1098(93)90597-g)

86. Silva, S. W. d., Galzerani, J. C., Lubyshev, D. I., & Basmaji, P. (1998). Surface phonon observed in GaAs wire crystals grown on porous Si. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10(43), 9687–9690. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/10/43/011>
87. Efremov, M. D., Volodin, V. A., Sachkov, V. A., Preobrazhenski, V. V., Semyagin, B. R., Ledentsov, N. N., Ustinov, V. M., Soshnikov, I. P., Litvinov, D., Rosenauer, A., & Gerthsen, D. (2002). Raman study of GaAs quantum wires grown with partial filling of corrugated (311)A AlAs surfaces. *Microelectronics Journal*, 33(7), 535–540. [https://doi.org/10.1016/s0026-2692\(02\)00015-0](https://doi.org/10.1016/s0026-2692(02)00015-0)
88. Lozovoy, K. A., Korotaev, A. G., Kokhanenko, A. P., Dirko, V. V., & Voitsekhovskii, A. V. (2020). Kinetics of epitaxial formation of nanostructures by Frank–van der Merwe, Volmer–Weber and Stranski–Krastanow growth modes. *Surface and Coatings Technology*, 384, 125289. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125289>
89. Lorenz M, Wei H, Jung F, et al. Two-dimensional Frank–van-der-Merwe growth of functional oxide and nitride thin film superlattices by pulsed laser deposition. *Journal of Materials Research*. 2017;32(21):3936-3946. doi:10.1557/jmr.2017.266
90. Springholz, G., Frank, N., & Bauer, G. (1995). The origin of surface roughening in lattice-mismatched Frank van der Merwe type heteroepitaxy. *Thin Solid Films*, 267(1-2), 15–23. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(95\)06591-1](https://doi.org/10.1016/0040-6090(95)06591-1)
91. Cimalla, V., Zekentes, K., & Vouroutzis, N. (2002). Control of morphological transitions during heteroepitaxial island growth by reflection high-energy electron diffraction. *Materials Science and Engineering: B*, 88(2-3), 186–190. [https://doi.org/10.1016/s0921-5107\(01\)00902-3](https://doi.org/10.1016/s0921-5107(01)00902-3)
92. Marchetto, H., Schmidt, T., Groh, U., Maier, F. C., Lévesque, P. L., Fink, R. H., Freund, H.-J., & Umbach, E. (2015). Direct observation of epitaxial organic film growth: temperature-dependent growth mechanisms and metastability. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(43), 29150–29160. <https://doi.org/10.1039/c5cp05124j>

93. Venäläinen, O., Heiniö, J., & Kaski, K. (1991). Stranski-Krastanov Growth of Thin Film: Monte Carlo Simulation. *Physica Scripta*, T38, 66–69. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/1991/t38/014>

94. Wang, L., Wang, X., Zhao, Z.-L., Wan, L.-J., & Wang, D. (2024). Stranski–Krastanov Growth of Two-Dimensional Covalent Organic Framework Films. *Journal of the American Chemical Society*. <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02418>

95. Yuan, H., Chen, Y., Lin, R., Tan, D., Zhang, J., Wang, Y., Gazit, E., Ji, W., & Yang, R. (2022). Modified Stranski–Krastanov Growth of Amino Acid Arrays toward Piezoelectric Energy Harvesting. *ACS Applied Materials & Interfaces*. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c13399>

96. Boz, F. K., Nisanci, B., Aktas, S., & Okan, S. E. (2016). Energy levels of GaAs/Al_xGa_{1-x}As/AlAs spherical quantum dot with an impurity. *Applied Surface Science*, 387, 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.06.035>

97. Jacob, J. M., Kim, D. S., Bouchalkha, A., Song, J. J., Klem, J. F., Hou, H., Tu, C. W., & Morkoç, H. (1994). Spatial characteristics of GaAs, GaAs-like, and AlAs-like LO phonons in GaAs/Al_xGa_{1-x}As superlattices: The strong x dependence. *Solid State Communications*, 91(9), 721–724. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(94\)00452-8](https://doi.org/10.1016/0038-1098(94)00452-8)

98. Reuter, D., Kähler, D., Kunze, U., & Wieck, A. D. (2001). Layer-compensated selectively doped Al_xGa_{1-x}As/GaAs heterostructures as a base material for nanolithography. *Semiconductor Science and Technology*, 16(7), 603–607. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/16/7/314>

99. Francaviglia, L., Fontana, Y., Conesa-Boj, S., Tütüncüoğlu, G., Duchêne, L., Tanasescu, M. B., Matteini, F., & Fontcuberta i Morral, A. (2015). Quantum dots in the GaAs/Al_xGa_{1-x}As core-shell nanowires: Statistical occurrence as a function of the shell thickness. *Applied Physics Letters*, 107(3), 033106. <https://doi.org/10.1063/1.4927315>

100. Wilhelm, T. S., Wang, Z., Baboli, M. A., Yan, J., Preble, S. F., & Mohseni, P. K. (2018). Ordered Al_xGa_{1-x}As Nanopillar Arrays via Inverse Metal-

Assisted Chemical Etching. ACS Applied Materials & Interfaces, 10(32), 27488–27497. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b08228>

101. Maitra, T., Pradhan, A., Mukherjee, S., Mukherjee, S., Nayak, A., & Bhunia, S. (2019). Evaluation of spontaneous superlattice ordering in MOCVD grown Al_xGa_{1-x}As epilayer on GaAs (100) using X-ray reflectivity and rocking curve analysis. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 106, 357–362. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2018.03.020>

102. Shen, L.-H., Zhang, G.-L., & Yang, D.-C. (2016). Controllable GMR device in a δ -doped, magnetically and electrically modulated GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterostructure. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 83, 450–454. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.01.014>

103. Maxwell Andrews, A., Schramböck, M., & Strasser, G. (2008). InAs Quantum Dots on Al_xGa_{1-x}As Surfaces and in an Al_xGa_{1-x}As Matrix. In Handbook of Self Assembled Semiconductor Nanostructures for Novel Devices in Photonics and Electronics (pp. 62–83). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-046325-4.00002-5>