

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:
Синтез нанодротів AlGaAs на поверхні mono-GaAs

Виконала здобувач вищої освіти
2 курсу, групи М2ПФН
Спеціальності:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
Маріанна СИЧКОВА
Керівник: д.т.н., проф. Яна СИЧКОВА
(прізвище та ініціали)
Рецензент: д.т.н., с.н.с. Ярослав
ЖИДАЧЕВСЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

Бердянськ – 2023 рік

ЗМІСТ

ВСТУП.....	2
РОЗДІЛ 1. Методика проведення експерименту та методи дослідження.....	6
<i>1.1 Методика експерименту</i>	<i>6</i>
<i>1.2 Методи дослідження.....</i>	<i>9</i>
РОЗДІЛ 2. Дослідження характеристик нанодротів AlGaAs.....	11
<i>2.1 Морфологічний аналіз нанодротів</i>	<i>11</i>
<i>2.2 Дослідження компонентного складу нанодротів AlGaAs</i>	<i>13</i>
<i>2.3 Рентгеноструктурний аналіз.....</i>	<i>16</i>
<i>2.4 Дослідження спектрів комбінаційного розсіяння світла.....</i>	<i>19</i>
РОЗДІЛ 3. Механізм утворення нанодротів AlGaAs на поверхні арсеніду галію.....	25
<i>3.1 Якісна модель росту нанодротів.....</i>	<i>25</i>
<i>3.2 Перспективи застосувань та подальших досліджень.....</i>	<i>28</i>
ВИСНОВКИ.....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	30

ВСТУП

Розвиток сучасної електронної техніки та сонячної енергетики спонукає дослідників всього світу до пошуків нових матеріалів з покращеними властивостями [1, 2]. Сьогодні активно розвиваються методи напівпровідникової технології, які дозволяють отримувати широкий клас матеріалів з властивостями, які можна налаштовувати в залежності від співвідношення компонентів [3 - 5]. Так, було показано, що потрійні сполуки на основі $Cd_xTe_yO_z$ змінюють свої властивості залежно від концентрації Cd та Te у сплаві [6, 7]. Аналогічні висновки були отримані для $CuGa_xIn_{1-x}S_2$ та інших сполук [8, 9].

Ще одним дієвим способом налаштування властивостей матеріалів є наноструктурування поверхні [10 - 12]. Неодноразово було показано, що прості методи електрохімічної обробки можуть істотним чином вплинути на поверхневу макро- та мікро-архітектуру напівпровідників [13]. Так, для матеріалів групи АЗВ5 та кремнію сьогодні відомим є широкий перелік електролітів [14]. Взагалі, сьогодні кремній все ще займає ведучі позиції у мікро-електронній промисловості [15]. Проте, для багатьох застосувань у сфері перетворення енергії сьогодні віддають перевагу матеріалам групи АЗВ5, таким як InP, GaP, GaAs [16]. В свою чергу, GaAs є прямим конкурентом кремнієвої технології [17]. Цей матеріал має високу рухливість носіїв заряду, малу діелектричну проникність та високу поглинаючу здатність [18]. З іншого боку, арсенід галію має ширину забороненої зони в області 1.42 eV, що дещо обмежує галузі його застосування. Для того, щоб розширити ці перспективи, сьогодні розроблено багато технологій створення потрійних сполук на основі GaAs [19, 20]. Так, було показано, що при сплавленні його з атомами індію, вдається створити потрійну сполуку $In_xGa_{1-x}As$ [21]. Чим більше у складі сполуки індію, тим більше ми спостерігаємо зміщення електромагнітного спектру в інфрачервону область спектру до мінімального

значення 0,354 eV [22]. Це дозволяє розширити застосування $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, зокрема у якості матеріалів для інфрачервоної оптики [23].

З іншого боку, сьогодні також існує запит на напівпровідники з широкою забороненою зоною (WBG) [24]. Такі напівпровідники дозволяють компонентам силової електроніки бути меншими, швидшими, надійними та ефективнішими [25]. Крім того, вони, як правило, володіють вищою рухливістю електронів і швидкістю насичення електронів, що забезпечує вищі частоти перемикання [26]. Наостанок, компоненти, виготовлені з напівпровідників WBG, також працюють при вищих напругах і температурах, ніж звичайні напівпровідникові матеріали [27].

Для того, щоб розширити ширину забороненої зони GaAs було запропоновано технології насиченням його алюмінієм [28]. До цих технологій належать: молекулярно-променева епітаксія, рідкофазна епітаксія, вакуумне осадження тощо [29, 30]. Зазвичай, ці методи потребують високотехнологічного обладнання, довгих термінів обробки, високих температур, вакууму, та значних ресурсів. Це все сповільнює прогрес у застосуванні таких матеріалів в промислових масштабах. На противагу цим методам дослідники все частіше звертають увагу на прості та недорогі методики: електрохімічного та хімічного травлення, електрохімічного осадження та комбінації цих методів [31, 32]. Перевагами таких методів є дешевизна, простота та короткі терміни обробки [33, 34]. До недоліків зазвичай відносять слабку контрольованість процесу та високу імовірність забруднення поверхні продуктами реакції [35]. Тому подальший розвиток електрохімічних технологій залишається актуальною задачею.

Раніше було показано, що електрохімічна обробка напівпровідників групи АЗВ5 в розчинах кислих електролітів призводить до формування поруватих шарів, текстурування поверхні, наноструктурування з утворенням кристалітів, наноголок, нанодротів тощо [36]. Разом з тим, часто на межі розділу електроліт-напівпровідник можуть відбуватися альтернативні

електрохімічні реакції, а саме осадження продуктів розчинення на поверхню напівпровідника [37]. Це може призводити до формування щільних плівок або росту наноструктурованих кристалітів [38]. Ці ефекти стали об'єктом інтересу багатьох дослідників, спонукаючи їх шукати різні склади електролітів для контрольованих процесів електрохімічного осадження [39].

Об'єктом дослідження синтез нанодротів AlGaAs на підкладці GaAs.

Предмет дослідження: нанодроти AlGaAs на підкладці GaAs.

Мета дослідження: удосконалити технологію синтезу AlGaAs на підкладці GaAs та дослідити основні морфологічні, фазові та компонентні характеристики

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

1. Удосконалити метод синтезу нанодротів AlGaAs на підкладці GaAs.
2. Дослідити морфологічні властивості синтезованої наноструктури.
3. Дослідити компонентні та фазові особливості синтезованої наноструктури.

Наукова новизна:

1. Удосконалено метод синтезу нанодротів AlGaAs шляхом використання методу електрохімічного осадження.
2. Набули подальшого розвитку теоретичні аспекти механізму формування нанодротів AlGaAs.
3. Вперше було запропоновано проводити попередню підготовку поверхні GaAs, а саме електрохімічне текстурування для формування м'якого буферного шару.

Практична значимість:

1. Нанодроти AlGaAs на підкладці GaAs можуть бути використані для створення високоефективних напівпровідникових пристроїв, таких як світлодіоди, лазерні діоди, та транзистори. Це може призвести до підвищення ефективності, зменшення розмірів та зниження енергоспоживання.

2. Вдосконалені нанодроти можуть бути використані для створення більш ефективних фотовольтаїчних елементів, що сприяє розвитку альтернативних джерел енергії.
3. Покращення властивостей нанодротів AlGaAs збільшує їхню привабливість для використання у високо інтегрованих на електронних схемах.
4. Нанодроти AlGaAs можуть бути використані для створення чутливих датчиків, здатних виявляти надзвичайно малі кількості хімічних речовин, що є важливим для медичної діагностики, біологічних досліджень та екологічного моніторингу.
5. Оскільки нанодроти можуть демонструвати квантові ефекти, ваше дослідження може сприяти розвитку квантових комп'ютерів, що змінить розуміння обчислювальної техніки.

ВИСНОВКИ

1. Результати, представлені у роботі, демонструють можливість вирощування нанодротів AlGaAs на поверхні GaAs простим і недорогим методом електрохімічного осадження.

2. Завдяки попередній підготовці поверхні GaAs шляхом проведення структування методом електрохімічного травлення, було сформовано розгалужену систему нановіскерів, які утворюють суцільний шар острівців.

3. Було досліджено структурні, морфологічні та компонентні показники отриманої сполуки. Результати XRD аналізу показали наявність спектрів, що відповідають $Al_{0,71}Ga_{0,29}As$, AlAs, GaAs. Загалом, ці три сполуки мають майже однакові параметри кристалічних ґраток, що ускладнює їхню інтерпретацію.

4. Розрахована за спектром фотолюмінесценції ширина забороненої зони 2.067 eV для $Al_{0,71}Ga_{0,29}As$ ($x=0,71$) показала невелике синє зміщення відносно теоретичного значення $E_g=2.016$ eV, ймовірно, через посилення ефектів квантового обмеження, пов'язаних із проявом ефектів розмірного квантування.

5. Загалом, можна зробити висновок, що структура має хорошу кристалічність і однорідність. Ці результати дають додаткову підтримку методу електрохімічного осадження, який є недорогим, гнучким, і дозволяє формувати широкий клас дво- та тривимірних матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Su Z, Yang Y, Huang Q, Chen R, Ge W, Fang Z, et al. Designed biomass materials for “green” electronics: A review of materials, fabrications, devices, and perspectives. *Prog Mater Sci.* 2022;125:100917. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100917>
2. Mahmood K, Sarwar S, Mehran MT. Current status of electron transport layers in perovskite solar cells: materials and properties. *RSC Adv.* 2017;7:17044–17062. <https://doi.org/10.1039/C7RA00002B>
3. Suchikova YA, Kidalov VV, Sukach GA. Influence of the carrier concentration of indium phosphide on the porous layer formation. *J Nano Electron Phys.* 2010;2:75–81.
4. Karipbayev ZT, Kumarbekov K, Manika I, Suchikova Y, Popov AI. Optical, Structural, and Mechanical Properties of Gd₃Ga₅O₁₂ Single Crystals Irradiated with 84Kr⁺ Ions. *Phys Status Solidi B.* 2022;259:2100415. <https://doi.org/10.1002/pssb.202100415>
5. Yana S. Porous indium phosphide: Preparation and properties. In: *Handbook of Nanoelectrochemistry: Electrochemical Synthesis Methods, Properties, and Characterization Techniques.* 2016. p. 283–306. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15207-3_28-1
6. Suchikova Y, Kovachov S, Bohdanov I, Moskina A, Popov A. Characterization of Cd_xTeyO_z/CdS/ZnO Heterostructures Synthesized by the SILAR Method. *Coatings.* 2023;13:639. <https://doi.org/10.3390/coatings13030639>
7. Suchikova, Y., Kovachov, S., Bohdanov, I. et al. Study of the structural and morphological characteristics of the Cd_xTeyO_z 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>

8. Grechenkov, J.; Gopejenko, A.; Bocharov, D.; Isakoviča, I.; Popov, A.I.; Brik, M.G.; Piskunov, S. Ab Initio Modeling of $\text{CuGa}_{1-x}\text{In}_x\text{S}_2$, $\text{CuGaS}_2(1-x)\text{Se}_{2x}$ and $\text{Ag}_{1-x}\text{Cu}_x\text{GaS}_2$ Chalcopyrite Solid Solutions for Photovoltaic Applications. *Energies* 2023, 16, 4823. <https://doi.org/10.3390/en16124823>
9. Kılıç HS, Gezgin SY, Üzüm Ö, Gündoğdu Y. Third order nonlinear optical properties of copper indium gallium selenide (CIGS) nanocrystal thin films. *Appl. Phys. B* 128, (May 2022). <https://doi.org/10.1007/s00340-022-07829-4>
10. Sychikova YA, Kidalov VV, Sukach GA. Dependence of the threshold voltage in indium-phosphide pore formation on the electrolyte composition. *J. Surface Investig.* 7, 626–630 (2013). <https://doi.org/10.1134/S1027451013030130>
11. Suohikova Y, Vambol S, Vambol V, Mozaffari N. Justification of the most rational method for the nanostructures synthesis on the semiconductors surface. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 92, 19–28 (2019). <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.3184>
12. Vambol SO, Bogdanov IT, Vambol VV, Suchikova YaO, Kovachov SS. Correlation between technological factors of synthesis of por-gap and its acquired properties. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii.* 16, 657–670 (2018).
13. Foell H, Langa S, Carstensen J, Christophersen M, Tiginyanu IM. Pores in III–V semiconductors. *Adv. Mater.* 15, 183–198 (2003). <https://doi.org/10.1002/adma.200390043>
14. Langa S, Carstensen J, Christophersen M, Steen K, Frey S, Tiginyanu IM, Föll H. Uniform and nonuniform nucleation of pores during the anodization of Si, Ge, and III-V semiconductors. *J. Electrochem. Soc.* 152, C525 (2005). <https://doi.org/10.1149/1.1940847>
15. Zhang L, Zheng Z, Lou X. A review of WBG and Si devices hybrid applications. *Chin. J. Electr. Eng.* 7, 1-20 (2021). <https://doi.org/10.1361/105994903770343132>

16. Sobolev MS, Ilkiv IV, Lazarenko AA, Mizerov AM, Nikitina EV, Pirogov EV, Bouravleuv AD. Monolith GaAsP/Si dual-junction solar cells grown by MBE. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1410, 012040 (2019). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012040>
17. Zhang WW, Qi H, Ji YK, He MJ, Ren YT, Li Y. Boosting photoelectric performance of thin film GaAs solar cell based on multi-objective optimization for solar energy utilization. *Solar Energy* 230, 1122-1132 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.031>
18. Ajayan J, Nirmal D, Mohankumar P, Kuriyan D, Fletcher AA, Arivazhagan L, Kumar BS. GaAs metamorphic high electron mobility transistors for future deep space-biomedical-military and communication system applications: A review. *Microelectronics Journal* 92, 104604 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2019.104604>
19. Steiner MA, France RM, Buencuerpo J, Geisz JF, Nielsen MP, Pusch A, et al. High efficiency inverted GaAs and GaInP/GaAs solar cells with strain-balanced GaInAs/GaAsP quantum wells. *Advanced Energy Materials* 11, 2002874 (2021). <https://doi.org/10.1002/aenm.202002874>
20. Quandt D, Arsenijević D, Strittmatter A, Bimberg DH. Static and Dynamic Characteristics of In (AsSb)/GaAs Submonolayer Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 55, 1-7 (2019). <https://doi.org/10.1109/JQE.2019.2913877>
21. Zhang J, Itzler MA, Zbinden H, Pan JW. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication. *Light: Science & Applications* 4, e286 (2015). <https://doi.org/10.1038/lsa.2015.59>
22. Lindsey ZR, West M, Jacobson P, Ray JR. Benchtop Electrochemical Growth and Controlled Alloying of Polycrystalline In_xGa_{1-x}As Thin Films. *Crystal Growth & Design* 22, 4228–4235 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.2c00241>

23. Zhang, X. et al. Ultralow Threshold, Single-Mode InGaAs/GaAs Multiquantum Disk Nanowire Lasers. *ACS Nano* 15, 9126–9133 (2021). <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c02425>
24. Woods-Robinson, R. et al. Wide band gap chalcogenide semiconductors. *Chem. Rev.* 120, 4007-4055 (2020). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00600>
25. Zhang, B. & Wang, S. A survey of EMI research in power electronics systems with wide-bandgap semiconductor devices. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 8, 626-643 (2019). <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2953730>
26. Shur, M. Wide band gap semiconductor technology: State-of-the-art. *Solid-State Electron.* 155, 65-75 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.sse.2019.03.020>
27. Zheng, S. et al. Symmetry-Guaranteed High Carrier Mobility in Quasi-2D Thermoelectric Semiconductors. *Adv. Mater.* 35, 2210380 (2023). <https://doi.org/10.1002/adma.202210380>
28. Gil-Corrales, J.A., Morales, A.L., Yücel, M. B., Kasapoglu, E. & Duque, C.A. Electronic Transport Properties in GaAs/AlGaAs and InSe/InP Finite Superlattices under the Effect of a Non-Resonant Intense Laser Field and Considering Geometric Modifications. *Int. J. Mol. Sci.* 23, 5169 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms23095169>
29. Kawaharazuka, A., Onomitsu, K., Nishinaga, J. & Horikoshi, Y. Effect of excitons on the absorption in the solar-cell with AlGaAs/GaAs superlattice grown by molecular beam epitaxy. *J. Crystal Growth* 323, 504-507 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.12.051>
30. Bahar, M. K., Rodríguez-Magdaleno, K. A., Martínez-Orozco, J. C., Mora-Ramos, M. E. & Urgan, F. A. T. Í. H. Optical properties of a triple AlGaAs/GaAs quantum well purported for quantum cascade laser active region. *Mater. Today Commun.* 26, 101936 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101936>

31. Suchikova, Y.O. et al. Oxidation of the n-GaAs Surface: Morphological and Kinetic Analysis. *J. Nano- Electron. Phys.* 14, 03033 (2022). [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(3\).03033](https://doi.org/10.21272/jnep.14(3).03033)
32. Suchikova, Y. et al. Formation of porous Ga₂O₃/GaAs layers for electronic devices. In *Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022*, 410–413 (2022). <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766890>
33. Kovachov, S. et al. Layer-by-Layer Synthesis and Analysis of the Phase Composition of Cd_xTeyO_z/CdS/por-ZnO/ZnO Heterostructure. In *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2022 - Conference Proceedings (2022)*. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916492>
34. Kovachov, S. et al. About synthesis mechanism of periodic oxide nanocrystallites on surface of single-crystal. *Phys. Chem. Solid State* 24, 159–165 (2023). <https://doi.org/10.1109/10.15330/pcss.24.1.159-165>
35. Suchikova, Y. O. et al. Optimal ranges determination of morphological parameters of nanopatterned semiconductors quality for solar cells. *Arch. Mater. Sci. Eng.* 101, 15–24 (2020). <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.9502>.
36. Ko, F. K. et al. Formation of Nanofibers and Nanotubes Production. In Guceri, S., Gogotsi, Y. G. & Kuznetsov, V. (eds) *Nanoengineered Nanofibrous Materials*. NATO Science Series 169, Springer, Dordrecht (2004). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2550-1_1
37. Shetti, N. P. et al. Fabrication of ZnO nanoparticles modified sensor for electrochemical oxidation of methdilazine. *Appl. Surf. Sci.* 496, 143656 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143656>
38. Bisquert, J. et al. A review of recent results on electrochemical determination of the density of electronic states of nanostructured metal-oxide semiconductors

- and organic hole conductors. *Inorg. Chim. Acta* 361, 684-698 (2008).
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2007.05.032>
39. Islam, S. et al. Recent Advancements in Electrochemical Deposition of Metal-Based Electrode Materials for Electrochemical Supercapacitors. *Chem. Rec.* 22, e202200013 (2022). <https://doi.org/10.1002/tcr.202200013>
40. Liu, X., Wang, F. & Wang, Q. Nanostructure-based WO₃ photoanodes for photoelectrochemical water splitting. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 14, 7894–7911 (2012). <https://doi.org/10.1039/C2CP40976C>
41. Suchikova, Y., Kovachov, S. & Bohdanov, I. Formation of oxide crystallites on the porous GaAs surface by electrochemical deposition. *Nanomaterials Nanotechnol.* 12, (2022). <https://doi.org/10.1177/18479804221127307>
42. Vambol, S. O., Bohdanov, I. T., Vambol, V. V., Nestorenko, T. P. & Onyschenko, S. V. Formation of filamentary structures of oxide on the surface of monocrystalline gallium arsenide. *J. Nano- Electron. Phys.* 9, 06016 (2017).
[https://doi.org/10.21272/jnep.9\(6\).06016](https://doi.org/10.21272/jnep.9(6).06016)
43. Scherrer, P. Determination of the size and internal structure of colloidal particles using X-rays. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen* 2, 98–100 (1918).
44. Langford, J. & Wilson, A. Scherrer after sixty years: A survey and some new results in the determination of crystallite size. *J. Appl. Crystallogr.* 11, 102–113 (1978).
45. Kuryliuk, V., Podolian, A. & Korotchenkov, O. Acoustically driven charge separation in semiconductor heterostructures sensed by optical spectroscopy techniques. *Open Phys.* 8, 1 (2010). <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0094-9>
46. Kim, O. K. & Spitzer, W. G. *J. Appl. Phys.* 50, 4362–4370 (1979).
<https://doi.org/10.1063/1.326422>
47. Nakahara, J., Ichimori, T., Minomura, S. & Kukimoto, H. *J. Phys. Soc. Jpn.* 56, 1010–1016 (1987). <https://doi.org/10.1143/jpsj.56.1010>

48. Guo, L.W.; Han, Y.J.; Hu, C.Y.; Tan, P.H.; Yang, F.H.; Huang, Q.; Zhou, J.M. Raman study of low-temperature-grown Al_{0.29}Ga_{0.71}As/GaAs photorefractive materials. *Phys. Rev. B* 2002, 65, 125325. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.125325>
49. Wang, Y.; Zahid, F.; Zhu, Y.; Wang, J.; Guo, H. Band offset of GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterojunctions from atomistic first principles. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 102, 132109. <https://doi.org/10.1063/1.4800845>
50. Adachi, S. *GaAs and Related Materials*. World Scientific (1994). <https://doi.org/10.1142/2508>
51. Brown, M.A.; Abbas, Z.; Kleibert, A.; May, S.; Squires, T.M. Determination of surface potential and electrical double-layer structure at the aqueous electrolyte-nanoparticle interface. *Phys. Rev. X* 2016, 6, 011007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.6.011007>
52. Suchikova, Y., Kovachov, S., Lazarenko, A. & Bohdanov, I. Research of synthesis conditions and structural features of heterostructure Al_xGa_{1-x}As/GaAs of the 'desert rose' type. *Appl. Surf. Sci. Adv.* 12, 100327 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100327>
53. Sun, X.W.; Huang, H.C.; Kwok, H.S. On the initial growth of indium tin oxide on glass. *Appl. Phys. Lett.* 1996, 68, 2663–2665. <https://doi.org/10.1063/1.116274>
54. Floro, J.A.; Hearne, S.J.; Hunter, J.A.; Seel, S.C.; Thompson, C.V. The dynamic competition between stress generation and relaxation mechanisms during coalescence of Volmer-Weber thin films. *J. Appl. Phys.* 2001, 89, 4886–4897. <https://doi.org/10.1063/1.1352563>
55. Pan, L.; Lew, K.-K.; Redwing, J.M.; Dickey, E.C. Stranski-Krastanow growth of germanium on silicon nanowires. *Nano Lett.* 2005, 5, 1081–1085. <https://doi.org/10.1021/nl050605z>