



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 621.892

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9851>

Влияние условий магнетронного распыления на структуру и морфологию поверхности тонких пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs (100)

О. В. Девецкий^{1,2✉}, А. А. Захаров¹, Л. С. Лунин^{1,2}, И. А. Сысоев¹, А. С. Пашенко^{1,2},
Д. С. Вакалов², О. М. Чапура²

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН,
пр. Чехова, 41, Ростов-на-Дону 344006, Российская Федерация

²Северо-Кавказский федеральный университет,
ул. Пушкина, 1, Ставрополь 355017, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты исследования структуры и морфологии поверхности тонких пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs. Тонкие пленки были получены методом магнетронного распыления из специально сформированной мишени $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ в атмосфере аргона.

Полученные образцы тонких пленок исследовали методами комбинационного рассеяния света, атомно-силовой микроскопии, сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Показано, что зерна пленок, полученных при температуре подложки ниже 600 °С не имеют огранки и образованы сращиванием зерен с размером 30–65 нм. При температуре подложки 600 °С пленка состояла из субмикронных зерен с хорошо заметной огранкой.

Определено, что с увеличением температуры подложки средний размер зерна увеличивается, а среднеквадратическая шероховатость тонких пленок снижается. Наилучшими структурными свойствами обладают тонкие пленки, полученные при температуре подложки 600 °С.

Ключевые слова: магнетронное распыление, тонкие пленки, комбинационное рассеяние света, морфология поверхности, соединения A^3B^5

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра Южного научного центра РАН номер государственной регистрации 122020100326-7, а также с использованием ресурсов центра коллективного пользования Северо Кавказского федерального университета и при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0029 (соглашение № 075-15-2021-687).

Благодарности: авторы выражают благодарность СКФУ за помощь в рамках конкурса поддержки проектов научных групп и отдельных ученых Северо-Кавказского федерального университета.

Для цитирования: Девецкий О. В., Захаров А. А., Лунин Л. С., Сысоев И. А., Пашенко А. С., Вакалов Д. С., Чапура О. М. Влияние условий магнетронного распыления на структуру и морфологию поверхности тонких пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs (100). *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(3): 300–305. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9851>

For citation: Devitsky O. V., Zakharov A. A., Lunin L. S., Sysoev I. A., Pashchenko A. S., Vakalov D. S., Chapura O. M. Influence of magnetron sputtering conditions on the structure and surface morphology of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ thin films on a GaAs (100) substrate. *Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(3): 300–305. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9851>

✉ Девецкий Олег Васильевич, e-mail: v2517@rambler.ru

© Девецкий О. В., Захаров А. А., Лунин Л. С., Сысоев И. А., Пашенко А. С., Вакалов Д. С., Чапура О. М., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Полупроводниковые соединения A^3B^5 являются важнейшими и широко востребованными материалами в фотовольтаике и оптоэлектронике. Наиболее распространенными методами для получения тонких пленок и гетероструктур соединений A^3B^5 на сегодняшний день являются методы: молекулярно-лучевая эпитаксия, химическое осаждение из паровой фазы металлоорганических соединений, ионно-лучевое осаждение, импульсное лазерное напыление [1–5]. Другим методом получения тонких пленок соединений A^3B^5 является магнетронное распыление. Этим методом уже были получены тонкие пленки $GaSb$, $Al_xGa_{1-x}N$, $In_xAl_{1-x}N$, $GaAs_{1-y}N_y$, $In_xGa_{1-x}N$, а также $In_xGa_{1-x}As$ на различных подложках [6–12]. Твердый раствор $In_xGa_{1-x}As$ имеет широкое применение в современной оптоэлектронике [13], однако получение тонких пленок методом магнетронного распыления, несмотря на свою актуальность, требует решения некоторых задач. В большей степени они связаны с недостаточным изучением влияния параметров магнетронного распыления на свойства тонких пленок $In_xGa_{1-x}As$. Существует некоторое количество работ, в которых используется техника совместного распыления из мишеней $GaAs$ и In с высокой степенью чистоты [14], либо чередованием слоев $GaAs$ и In соответственно. Такая техника имеет определенные преимущества, но значительно усложняет процесс магнетронного распыления. Более целесообразно использование мишеней с заданным составом твердого раствора $In_xGa_{1-x}As$, процесс изготовления которых описан в работе [5].

Целью настоящей работы является выращивание методом магнетронного напыления тонких пленок $In_xGa_{1-x}As$, а также исследование их структурных свойств и морфологии поверхности.

2. Экспериментальная часть

В данной работе сообщается о получении тонких пленок $In_xGa_{1-x}As$ на подложках $GaAs$ (100) методом магнетронного распыления из мишени с расчётным составом $In_{0.45}Ga_{0.55}As$. Мишень формировалась методом спекания в атмосфере чистого водорода при температуре 700 °C порошков $GaAs$ и $InAs$ в течении 120 минут. Тонкие пленки $In_xGa_{1-x}As$ осаждались на $GaAs$ (100) при помощи магнетрона РМ1-60/1-02-02 ИТ в атмосфере аргона при давлении 8 Па. Расстояние от мишени до подложки – 100 мм, мощность распыления мишени – 1.8 Вт/см². Время

осаждения для всех образцов составляло 60 минут, а температура подложки изменялась от 400 до 600 °C. Толщина всех образцов тонких пленок составляла 0.42 мкм.

Микрофотографии поверхности и состав анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA3-LMN с системой определения элементного состава AZtecEnergy Standard/X-max20(standard). Толщина слоя определялась по микрофотографиям сколов в режиме контрастной топографии (SE-детектор). Структурные свойства исследовались методом комбинационного рассеяния света (КРС) на спектрометре inVia Raman Microscope (Renishaw) с длиной волны возбуждения лазера 514 нм при комнатной температуре. Исследование морфологии поверхности тонких пленок проводилось на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Ntegra Aura.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1–2 представлены СЭМ-изображения поверхности тонких пленок $In_xGa_{1-x}As$ на $GaAs$, выращенные при температуре подложки 400 и 600 °C. Из представленных изображений видно, что поверхность обеих пленок состоит из зерен, которые при увеличении температуры подложки до 600 °C приобретают огранку. Кроме этого на поверхности всех образцов тонких пленок присутствовали микрокапли (рис. 1б). Размер микрокапель не превышал 2 мкм, а их плотность составляла около 0.06 мкм² для тонкой пленки, полученной при 400 °C. Для тонких пленок, полученных при 500 и 600 °C микрокапли практически отсутствовали. Из представленных результатов видно, что для тонких пленок, полученных при 400 °C, наблюдается неклассический механизм роста, смысл которого заключается в ориентированном сращивании малых кристаллических зерен в поверхности более крупного зерна [15–16]. Поверхность пленок имеет достаточно высокую шероховатость, и наблюдаются зерна размером около 260 нм с неявно выраженными границами и полным отсутствием огранки. При увеличении температуры подложки до 500 °C на поверхности наблюдалось увеличение числа более крупных зерен (до 320 нм) со слабо выраженной огранкой. На поверхности пленки, выращенной при 600 °C, присутствует большое количество однородных зерен многогранной формы. Размер этих зерен не превышает 560 нм. Очевидно, что при увеличении размера зерна происходит улучшение структурных свойств пленки.

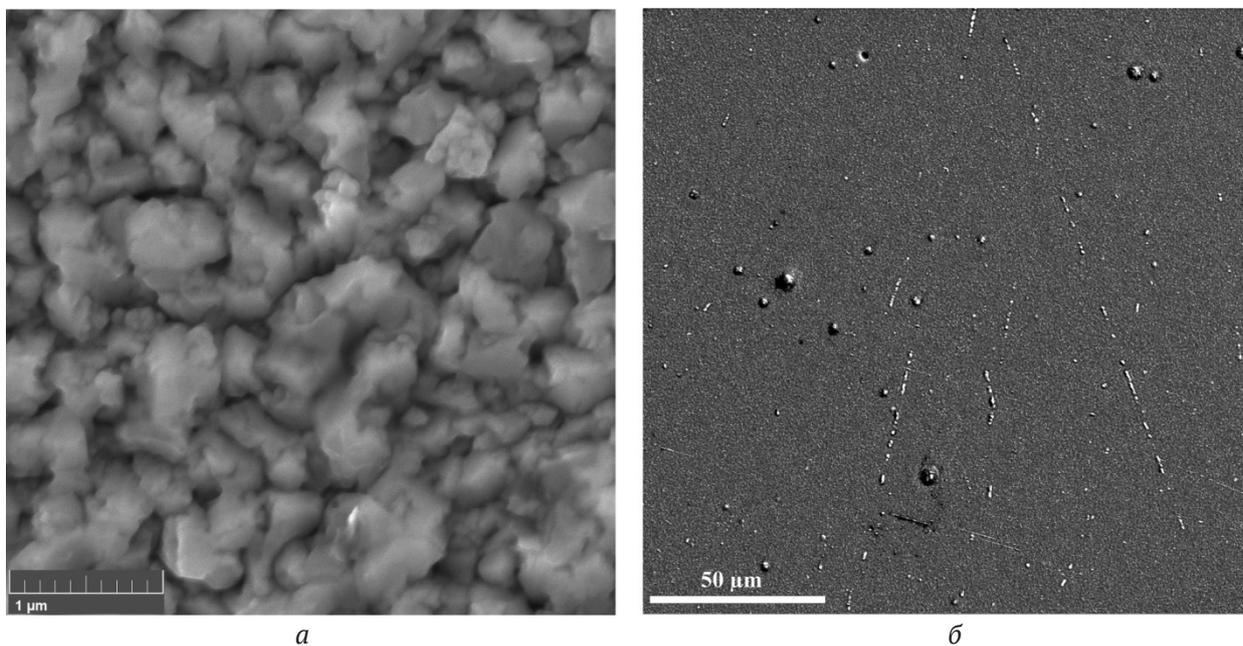


Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности тонкой пленки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs, выращенной методом магнетронного распыления при температуре 400 °С в режиме регистрации вторичных электронов при 10 кВ, 64 кВ (а) и 20 кВ (б)

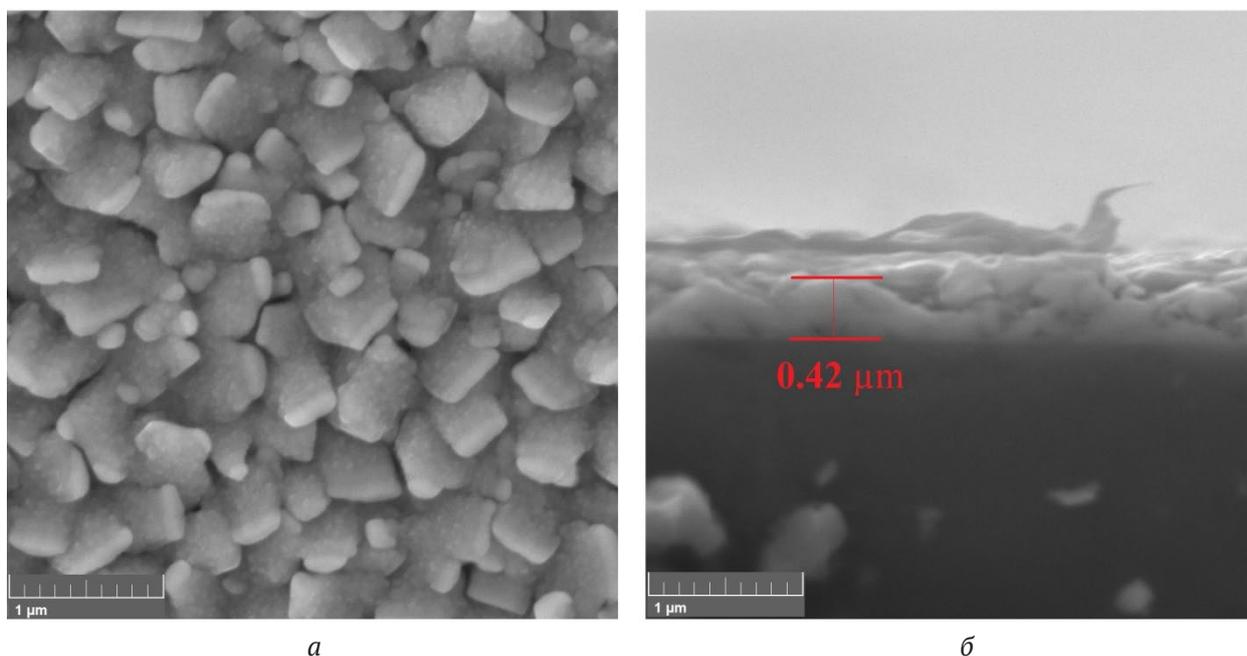


Рис. 2. СЭМ-изображение поверхности (а) и скола (б) тонкой пленки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs, выращенной методом магнетронного распыления при температуре 600 °С

Энергодисперсионный анализ показал, что пленки, выращенные при 400 и 500 °С, имеют состав близкий к $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$, в то время как для пленки, выращенной при 600 °С, наблюдалось более высокое содержание индия – $\text{In}_{0.43}\text{Ga}_{0.57}\text{As}$. Наиболее вероятным объяснением этому является то, что при низких значениях температуры подложки содержание ин-

дия в тонкой пленке снижается за счет сегрегации индия.

Для более полного изучения поверхности тонких пленок были проведены АСМ-исследования морфологии поверхности (рис. 3) и определена среднеквадратическая шероховатость поверхности (RMS). Было показано, что с увеличением температуры подложки от 400 до

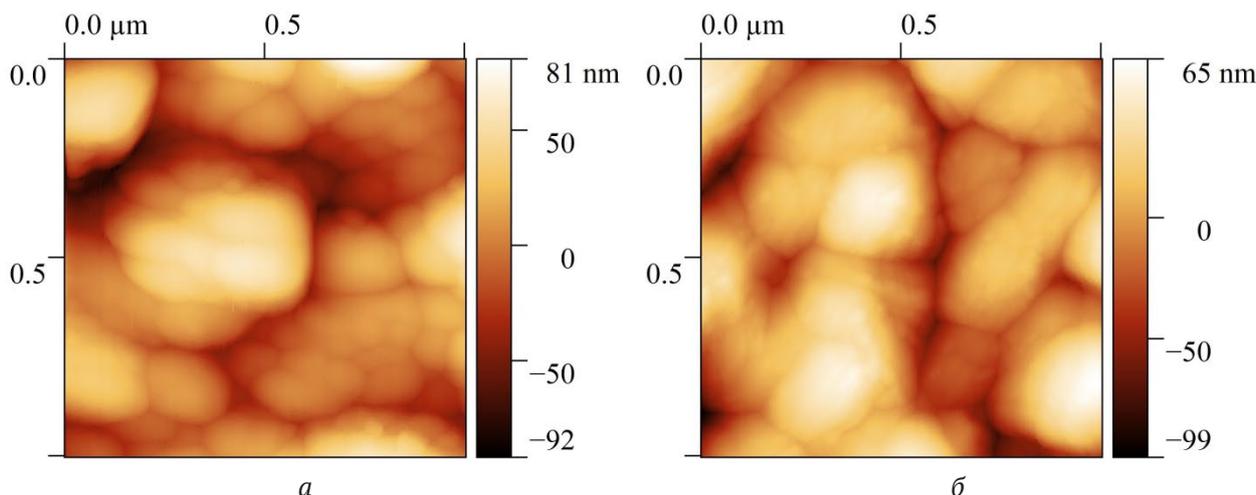


Рис. 3. АСМ-изображения тонких пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs, выращенных методом магнетронного распыления при температуре 400 °C (а) и 600 °C (б)

600 °C RMS тонких пленок снижается от 32.62 до 26.75 нм соответственно.

Влияние температуры подложки на структурные свойства тонких пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ также было исследовано по спектрам КРС (рис. 4). На спектрах можно идентифицировать две высокоинтенсивные поперечные (ТО) фоновые моды, относящиеся к InAs и GaAs, в частотных интервалах 219–223 cm^{-1} и 245–257 cm^{-1} соответственно. Следует отметить, что для пленки, выращенной при 400 °C, на спектре наблюдается наличие продольной (ЛО) оптической моды InAs, локализованной на частоте 223 cm^{-1} , и низкоинтенсивной GaAs (ЛО) моды – 287 cm^{-1} . Область в диапазоне 110–130 cm^{-1} можно связать с наличием на поверхности пленок микрокапель. Как следует из правил отбора, для идеального кристалла на спектрах КРС должны быть разрешены как ТО, так и ЛО фоновые моды [17]. Очевидно, что тонкие пленки, выращенной при 500 и 600 °C, имеют лучшее структурное совершенство, так как на их спектрах моды InAs (ТО) и GaAs (ТО) являются доминирующими. Смещение положения фонованной моды InAs (ТО) относительно положения частоты InAs (ТО) моды для объёмного InAs [14] (221 cm^{-1}) на 2 cm^{-1} наблюдалось только для пленок, выращенных при 400 и 500 °C, что характерно для тонких пленок при уменьшении в них концентрации In [18–21].

4. Заключение

Таким образом, методом магнетронного распыления были выращены тонкие пленки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs. Методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа показано, что тонкие

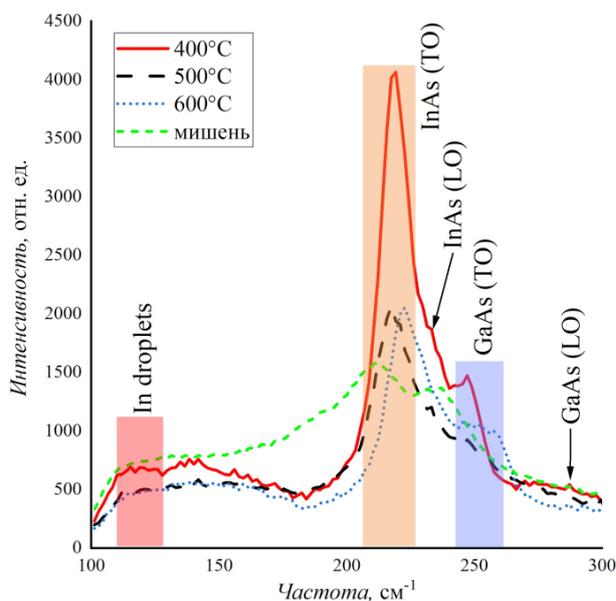


Рис. 4. Спектры КРС мишени $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ и тонких пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на GaAs, выращенных при разной температуре подложки

пленки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, полученные при температуре подложки 600 °C имеют состав наиболее близкий к составу распыляемой мишени. Из сравнения СЭМ-изображения поверхности тонких пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на GaAs видно, что температура подложки сильно влияет на морфологию поверхности и структуру пленки. Результаты исследования спектров комбинационного рассеяния света показали, что наилучшими структурными свойствами обладают тонкие пленки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, полученные при температуре подложки 600 °C. Представленные экспериментальные данные свидетельствуют о перспективности применения ме-

тогда магнетронного распыления для выращивания тонких пленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на GaAs.

Заявленный вклад авторов

Девицкий О. В. – идея экспериментов, написание текста, итоговые выводы. Захаров А. А. – проведение исследования. Сысоев И. А. – научное руководство, концепция исследования. Лунин Л. С. – научное руководство, написание обзора и редактирование текста. Пашченко А. С. – написание обзора и редактирование текста, итоговые выводы, Вакалов Д. С. – проведение исследования. Чапура О. М. – проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Wang W., Ma B., Chao Gao H., Long Yu H., Hui Li Z. Low surface roughness GaAs/Si thin-film deposition using three-step growth method in MBE. *Materials Science Forum*. 2020;1014(43): 43–51. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1014.43>
2. Devitsky O. V., Nikulin D. A., Sysoev I. A. Pulsed laser deposition of aluminum nitride thin films onto sapphire substrates. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2020;20(2): 177–184. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-2-177-184>
3. Lunin L. S., Devitskii O. V., Sysoev I. A., Pashchenko A. S., Kas'yanov I. V., Nikulin D. A., Irkha V. A. Ion-beam deposition of thin AlN films on Al_2O_3 substrate. *Technical Physics Letters*. 2019;45(24): 1237. <https://doi.org/10.1134/S106378501912023X>
4. Zhu H., Chen Y., Zhao Y., Li X., Teng Y., Hao X., Liu J., Zhu H., Wu Q., Huang Y., Huang Y. Growth and characterization of InGaAs/InAsSb superlattices by metal-organic chemical vapor deposition for mid-wavelength infrared photodetectors. *Superlattices and Microstructures*. 2020;146: 106655. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106655>
5. Pashchenko A. S., Devitsky O. V., Lunin L. S., Kasyanov I. V., Nikulin D. A., Pashchenko O. S. Structure and morphology of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates grown by pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*. 2022;743 139064. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.139064>
6. Bernal-Correa R., Gallardo-Hernández S., Cardona-Bedoya J., Pulzara-Mora A. Structural and optical characterization of GaAs and InGaAs thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Optik*. 2017;145: 608–616. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.08.042>
7. Zelaya-Angel O., Jiménez-Sandoval S., Alvarez-Fregoso O., Mendoza-Alvarez J.G., Gómez-Herrera M.L., Cardona-Bedoya J., Huerta-Ruelas J. Rhombohedral symmetry in $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ nanostructures. *Semiconductor Science and Technology*. 2021;36(4): 045026. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/abe319>
8. Mantarçı A. Comparison of optical, electrical, and surface characteristics of InGaN thin films at non-fow and small nitrogen fow cases. *Optical and Quantum Electronics*. 2021;53:544. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03203-4>
9. Nishimoto N., Fujihara J. Characterization of GaSb thin films with excess Ga grown by RF magnetron sputtering. *International Journal of Modern Physics B*. 2020;34(1020): 2050097. <https://doi.org/10.1142/S0217979220500976>
10. Othman N.A., Nayan N., Mustafa M.K., Azman Z., Hasnan M.M.I.M., Bakri A.S., Jaffar S.N., Abu Bakar A.S., Mamat M.H., Mohd Yusop M.Z., Ahmad M.Y. Structural and Morphological Properties of AlGaIn Thin Films Prepared by Co-sputtering Technique. In: *Proceedings - 2021 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics. 13th IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics, 2 -4 August 2021*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. 171420. p. 20 – 23. <https://doi.org/10.1109/RSM52397.2021.9511605>
11. Mulcúe L.F., de la Cruz W., Saldarriaga W. Efect of film thickness on morphological, structural and electrical properties of InAlN thin layers grown on glass at room temperature. *Applied Physics A*. 2021;127: 479. <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04618-2>
12. Ferhati H., Djeflal F., Bendjerad A., Benhaya A., Saidi A. Perovskite/InGaAs tandem cell exceeding 29% efficiency via optimizing spectral splitter based on RF sputtered ITO/Ag/ITO ultra-thin structure. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2021;128: 114618. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2020.114618>
13. Kao Y. C., Chou H. M., Hsu S. C., Lin A., Lin C. C., Shih Z. H., Chang C. L., Hong H. F., Horng R. H. Performance comparison of III–V//Si and III–V//InGaAs multi-junction solar cells fabricated by the combination of mechanical stacking and wire bonding. *Scientific Reports*. 2019;9 4308. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40727-y>
14. Bernal-Correa R., Torres-Jaramillo S., Pulzara-Mora C., Montes-Monsalve J., Gallardo-Hernández S., López-López M., Cardona-Bedoya J., Pulzara-Mora A. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ obtained from independent target via co-sputtering deposition. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;850: 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/850/1/012013>
15. Fedorov P. P., Mayakova M. N., Gaynutdinov R. V., Tabachkova N. Yu., Komandin G. A., Baranchikov A. E., Chernova E. V., Kuznetsov S. V., Ivanov V. K., Osiko V. V. Investigation of the deposition of calcium

fluoride nanoparticles on the chips of CaF_2 single crystals. *Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(4): 607–613. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3681>

16. Colfen H. Nonclassical nucleation and crystallization. *Crystals*. 2020;10(2): 61. <https://doi.org/10.3390/cryst10020061>

17. Loudon R., The Raman effect in crystals. *Advances in Physics*. 1964;52(13): 423–482. <https://doi.org/10.1080/00018736400101051>

18. Greene L. H., Dorsten J. F., Roshchin I. V., Abeyta A. C., Tanzer T. A., Feldmann W. L., Bohn P. W. Optical detection of the superconducting proximity effect: Raman scattering on Nb/InAs. *Czechoslovak Journal of Physics Supplement*. 1996;46(2): 741. <https://doi.org/10.1007/BF02583678>

19. Pulzara-Mora A., Montes-Monsalve J., Bernal-Correa R., Morales-Acevedo A., Gallardo-Hernández S., López-López M. Structural, optical and morphological properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layers obtained by RF magnetron sputtering. *Superficies y Vacío*. 2016;29(2) 32–37. Режим доступа: <https://superficiesyvacio.smctsm.org.mx/index.php/SyV/article/view/47/31>

20. Kang S., Jeong T. S. Indium composition dependence of Raman spectroscopy and photocurrent of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ strained layers grown by using MOCVD. *Journal of the Korean Physical Society*. 2020;76(3): 231. <https://doi.org/10.3938/jkps.76.231>

21. Groenen J., Carles R., Landa G. Optical-phonon behavior in $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$: the role of microscopic strains and ionic plasmon coupling. *Physical Review B*. 1998;58(16): 10452–10462. <https://doi.org/10.1103/physrevb.58.10452>

Информация об авторах

Девицкий Олег Васильевич, к. т. н., с. н. с. лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Ростов-на-Дону, Российская Федерация); с. н. с. научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>
v2517@rambler.ru

Захаров Алексей Андреевич, м. н. с. научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0379-9383>
v2517@rambler.ru

Сысоев Игорь Александрович, д. т. н., директор, научно-образовательный центр фотовольтаики и нанотехнологии, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0001-5415-0782>
v2517@rambler.ru

Лунин Леонид Сергеевич, д. ф.-м. н., г. н. с. лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Ростов-на-Дону, Российская Федерация); г. н. с. научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5534-9694>
lunin_ls@mail.ru

Пащенко Александр Сергеевич, к. ф.-м. н., с. н. с., заведующий лабораторией физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Ростов-на-Дону, Российская Федерация); с. н. с. научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-7976-9597>
as.pashchenko@gmail.com

Вакалов Дмитрий Сергеевич – к. ф.-м. н., заведующий научно-исследовательской лабораторией физико-химических методов анализа научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-6788-3811>
megadims@gmail.com

Чанура Олег Михайлович, инженер кафедры физической электроники физико-технического факультета, Северо-Кавказский федеральный университет, (Ставрополь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6691-0010>
chapurol-7@mail.ru

Поступила в редакцию 07.02.2022; одобрена после рецензирования 04.03.2022; принята к публикации 15.05.2022; опубликована онлайн 25.06.2022.