

07.2;07.3

Изопериодические гетероструктуры $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}/\text{InP}$ для планарных $p-n$ -фотодиодов

© М.Л. Лунина, Л.С. Лунин[✉], Д.Л. Алфимова, А.С. Пащенко, О.С. Пащенко

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

[✉] E-mail: lunin_ls@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2020 г.

В окончательной редакции 6 июля 2020 г.

Принято к публикации 6 июля 2020 г.

Методом зонной перекристаллизации градиентом температуры получены изопериодические гетероструктуры $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}/\text{InP}$ на длину волны 1.06–1.60 μm . Достигнута абсолютная спектральная чувствительность ~ 0.59 A/W и быстродействие ~ 10 ns. Пороговая чувствительность для изготовленных фотодиодов находится в диапазоне $2 \cdot 10^{-10}$ – $5 \cdot 10^{-11}$ W при соотношении сигнал/шум 10.

Ключевые слова: изопериодические гетероструктуры, фотоприемники, фотодиоды, абсолютная спектральная чувствительность, пороговая чувствительность, быстродействие, вольт-амперная характеристика.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.19.50044.18379

Применение $p-i-n$ -фотодиодов, где поглощение излучения происходит в слое объемного заряда, вместо классических $p-n$ -фотодиодов позволило повысить пороговую чувствительность, быстродействие фотоприемников, а также расширить полосу поглощения для систем регистрации оптического излучения [1].

Другим путем повышения пороговой чувствительности и быстродействия фотодиодов для систем оптической локации и дальнометрии является использование полупроводниковых прямозонных материалов A^3B^5 , имеющих высокие значения коэффициентов поглощения на длинах волн $\lambda = 1.06$ и 1.60 μm и малое время жизни неосновных носителей заряда. К таким материалам в первую очередь следует отнести полупроводниковые соединения GaInAsP [2–6] и GaInSbAsP [7–9]. Проведенные ранее расчеты показали, что в пятикомпонентной системе $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}$ могут быть выращены слои со спектральной чувствительностью в диапазоне $0.8 \leq \lambda \leq 1.8$ μm (обусловлено предельными значениями составов существования твердого раствора). Их практическое применение связано с вопросом совершенства, дешевизны и простотой получения высококачественных слоев.

Цель настоящей работы состоит в получении и исследовании изопериодических гетероструктур $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}/\text{InP}$ для $p-n$ -фотодиодов, работающих в спектральном диапазоне $0.8 \leq \lambda \leq 1.8$ μm .

Гетероструктуры $\text{GaInSbAsP}/\text{InP}$ были получены методом зонной перекристаллизации градиентом температуры [10]. Для выращивания гетероструктур $\text{GaInSbAsP}/\text{InP}$ был выбран интервал температур 873–953 К. Выбор сделан в результате исследования температур ликвидуса для каждого отдельного состава с помощью установки визуально-термического анализа [11].

На основе предварительного анализа диаграмм фазовых равновесий в гетеросистеме $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}-\text{InP}$ был определен состав жидкой фазы, необходимый для получения эпитаксиальных слоев твердых растворов заданного состава. Выбор составов твердых растворов GaInSbAsP осуществлялся с учетом устойчивости к спиновому распаду и согласованности параметров кристаллических решеток с подложкой InP при комнатной температуре. Проведенный анализ термодинамической устойчивости $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}-\text{InP}$ показал, что в пределах составов $0 \leq x \leq 0.9$ mol. frac., $0.001 \leq y \leq 0.500$ mol. frac., $0 \leq z \leq 1.0$ mol. frac. твердый раствор устойчив к спиновому распаду (рис. 1, а).

Для максимальной спектральной чувствительности и быстродействия фотодиодов важно обеспечить в первую очередь высокое качество гетероструктуры $\text{GaInSbAsP}/\text{InP}$, для этого необходимо согласование периодов решеток и коэффициентов термического расширения эпитаксиальных слоев и подложки. Составы твердых растворов $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}$, изопериодических подложкам InP , определялись методом линейной интерполяции периодов решеток бинарных компонентов с использованием данных [12]. На рис. 1, б представлены расчетные изопериодические линии для $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}/\text{InP}$. Общей тенденцией в твердом растворе является смещение изолиний при увеличении концентрации сурьмы (y) в сторону больших концентраций галлия (x). С ростом концентрации сурьмы уменьшается область изопериодических составов, для которых достигается согласование и по коэффициенту термического расширения. Характерным для твердых растворов GaInSbAsP является наличие прямых и не прямых переходов, тип которых определяется составом. Твердые растворы $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}$ с концентрацией сурьмы $0 \leq y \leq 0.6$ mol. frac. имели

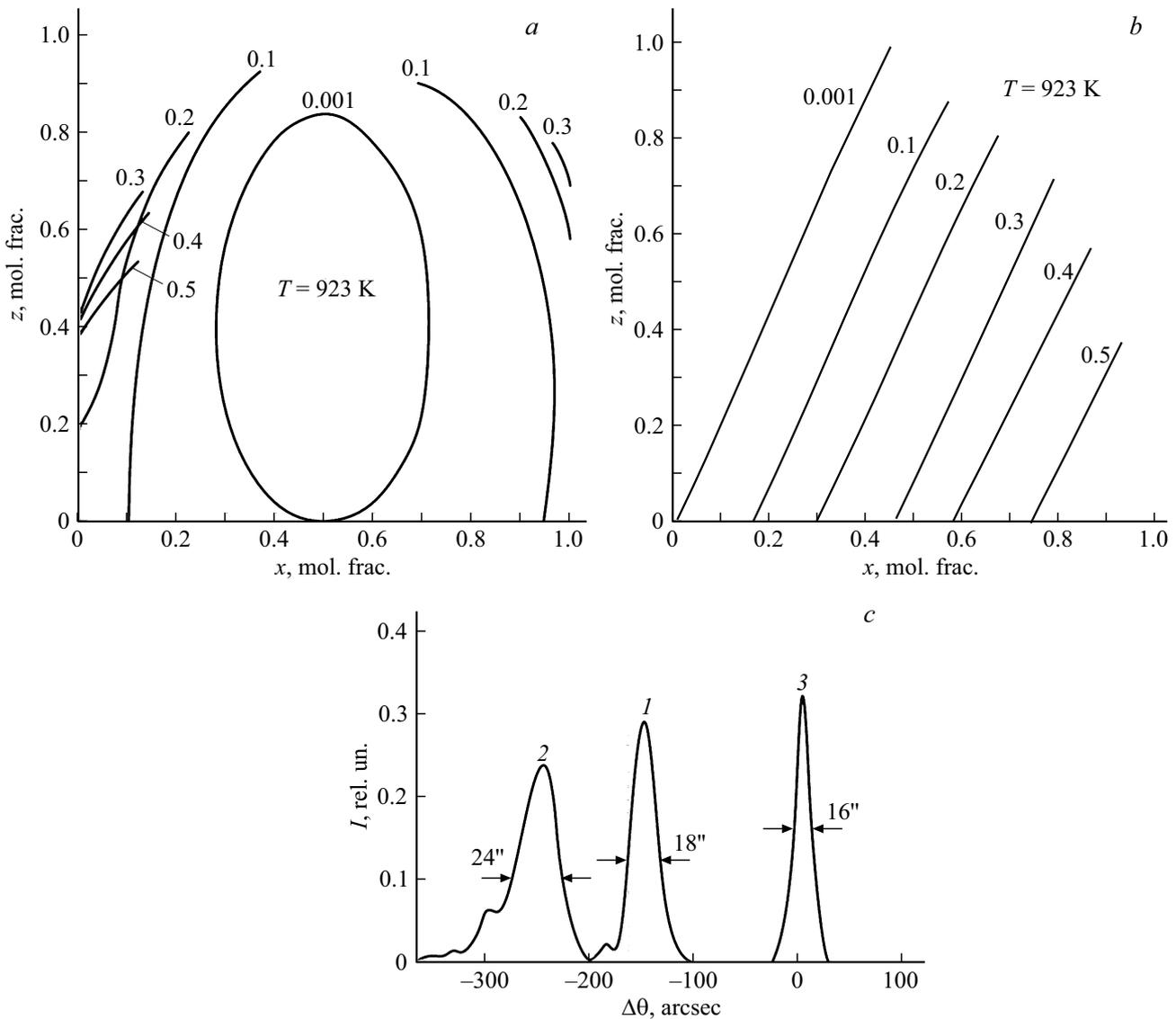


Рис. 1. Концентрационные зависимости области спинопального распада (a) и изопериодических линий (b) гетеросистем $Ga_xIn_{1-x}Sb_yAs_zP_{1-y-z}/InP$ (значения y указаны около кривых) и дифракционные кривые отражения (c). 1 — $Ga_{0.25}In_{0.75}Sb_{0.10}As_{0.20}P_{0.70}/InP$, 2 — $Ga_{0.1}In_{0.9}Sb_{0.02}As_{0.17}P_{0.81}/InP$, 3 — подложка InP.

переходы Г-типа, а для $y > 0.6$ mol. frac. реализовались непрямозонные переходы L-типа.

Определение несоответствия параметров решеток подложки и слоя и оценка кристаллического совершенства гетероструктур GaInSbAsP/InP осуществлялись методом рентгеновской дифракции. Для исследования структурного совершенства выращивались изопериодические гетероструктуры ($\Delta a/a < 10^{-3}$), составы которых были взяты из расчетных данных (рис. 1, a) в области существования твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}Sb_yAs_zP_{1-y-z}$.

Результаты исследований кривых дифракционного отражения рентгеновского излучения показали, что в изопериодической гетероструктуре $Ga_{0.25}In_{0.75}Sb_{0.10}As_{0.20}P_{0.70}/InP$ (изолиния 0.1, рис. 1, b)

интенсивность пиков и их ширина на половине максимума $B_{H/2}$ для слоя и подложки сравнимы (кривые 1 и 3 на рис. 1, c). Для неизоопериодической гетероструктуры $Ga_{0.1}In_{0.9}Sb_{0.02}As_{0.17}P_{0.81}/InP$ наблюдается значительное увеличение $B_{H/2}$ и уменьшение интенсивности пиков (кривая 2 на рис. 1, c).

Следует отметить, что увеличение $B_{H/2}$ кривой дифракционного отражения слоя сопровождается ростом аналогичной величины у подложки. Это связано с тем, что ухудшение структуры слоя приводит к появлению в нем дополнительных напряжений, воздействующих на подложку.

На основе полученных гетероструктур GaInSbAsP/InP были изготовлены планарные p-n-фотодиоды. Эпитаксиальная структура фотодиода

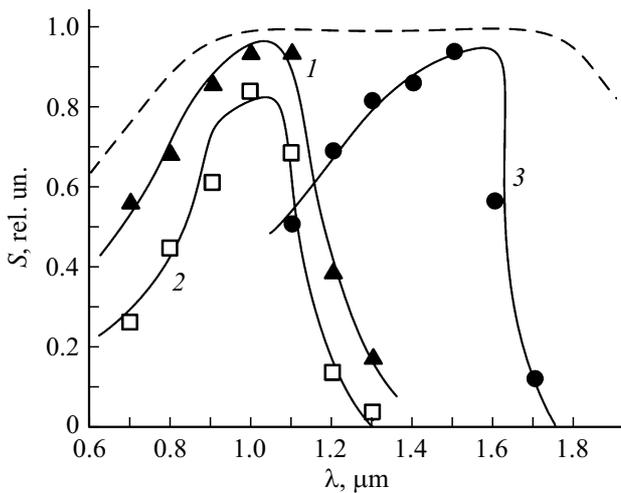


Рис. 2. Спектры фоточувствительности p - n -фотодиодов на основе гетероструктур $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}/\text{InP}$. 1 — $x = 0.25$ mol. frac., $y = 0.10$ mol. frac., $z = 0.20$ mol. frac.; 2 — $x = 0.10$ mol. frac., $y = 0.20$ mol. frac., $z = 0.20$ mol. frac.; 3 — $x = 0.62$ mol. frac.; $y = 0.30$ mol. frac., $z = 0.50$ mol. frac. Штриховой линией показана область спектральной чувствительности изопериодических гетероструктур $\text{GaInSbAsP}/\text{InP}$.

($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) состояла из верхнего слоя p^+ - InP ($1 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$) толщиной $0.5 \mu\text{m}$, поглощающего слоя n^0 - $\text{Ga}_{0.25}\text{In}_{0.75}\text{Sb}_{0.10}\text{As}_{0.20}\text{P}_{0.70}$ ($1 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$) толщиной $0.8 \mu\text{m}$ и подложки n^+ - InP ($3 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$). Диаметр фоточувствительной области составлял $800 \mu\text{m}$. Для фотодиода ($\lambda = 1.60 \mu\text{m}$) эпитаксиальная структура отличалась только составом поглощающего слоя — n^0 - $\text{Ga}_{0.62}\text{In}_{0.38}\text{Sb}_{0.30}\text{As}_{0.50}\text{P}_{0.20}$. Емкость p - n -перехода составляла $\sim 1 \text{pF}$. Экспериментальные спектры фоточувствительности планарных p - n -диодных структур приведены на рис. 2. Максимальное значение спектральной чувствительности p - n -фотодиода на основе изопериодической гетероструктуры $\text{Ga}_{0.25}\text{In}_{0.75}\text{Sb}_{0.10}\text{As}_{0.20}\text{P}_{0.70}/\text{InP}$ (кривая 1 на рис. 2) достигало 0.56 – 0.58 A/W (0.94 – 0.95 rel. un.) в диапазоне 1.04 – $1.08 \mu\text{m}$. Область спектральной чувствительности на уровне 0.5 от максимальной находилась в пределах 0.67 – $1.20 \mu\text{m}$. Для неизопериодической гетероструктуры $\text{Ga}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}_{0.2}\text{As}_{0.2}\text{P}_{0.6}/\text{InP}$ (кривая 2 на рис. 2) максимум спектральной чувствительности приходился на 1.05 – $1.07 \mu\text{m}$ и соответствовал значениям 0.47 – 0.52 A/W (0.80 – 0.82 rel. un.). Область спектральной чувствительности на уровне 0.5 от максимальной находилась в пределах 0.78 – $1.18 \mu\text{m}$. Теоретически возможное значение абсолютной спектральной чувствительности на длине волны $1.06 \mu\text{m}$ для p - n -фотодиодов без антиотражающих покрытий $\sim 0.6 \text{ A/W}$, что не намного больше, чем полученные экспериментальные значения для p - n -фотодиода на изопериодической гетероструктуре. Это связано в первую очередь с высоким качеством

эпитаксиальных слоев твердого раствора GaInSbAsP (кривая 1 на рис. 1, c), обеспечивающих большую диффузионную длину фотогенерированных носителей. По данным измерений, проведенных с использованием метода фотоэдс, диффузионная длина неосновных носителей заряда в гетероструктурах $\text{GaInSbAsP}/\text{InP}$ была порядка 2.5 – $3.0 \mu\text{m}$. Для p - n -фотодиода на основе неизопериодических гетероструктур $\text{Ga}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}_{0.02}\text{As}_{0.17}\text{P}_{0.81}/\text{InP}$ низкие значения спектральных характеристик объясняются дефектностью и ухудшением структурного совершенства (кривая 2 на рис. 1, c).

На рис. 2 (кривая 3) приведен спектр фоточувствительности p - n -фотодиода на основе изопериодической гетероструктуры $\text{Ga}_{0.62}\text{In}_{0.38}\text{Sb}_{0.30}\text{As}_{0.50}\text{P}_{0.20}/\text{InP}$ (изолиния 0.3, рис. 1, a) на длину волны $\lambda = 1.60 \mu\text{m}$.

Обратные ветви вольт-амперных характеристик p - n -фотодиодов на основе $\text{GaInSbAsP}/\text{InP}$ приведены на рис. 3. Величины пробивного напряжения p - n -фотодиода на длину волны $1.06 \mu\text{m}$ (кривая 1 на рис. 3) $U_{br} \sim 6.0 \text{ V}$ и на длину волны $1.60 \mu\text{m}$ (кривая 2 на рис. 3) $U_{br} \sim 5.5 \text{ V}$ соответствуют напряжению туннельного пробоя при исходной концентрации легирующей примеси (Zn) $p \sim 1 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$. Плавный характер начала пробоя свидетельствует об определенном влиянии краевого эффекта, связанного с состоянием границы раздела пассивирующий диэлектрик–полупроводник. Однако уровень плотности темнового тока $(2$ – $4) \cdot 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ и характер ее зависимости от напряжения при $U < U_{br}$ указывают на вероятное преобладание генерационно-рекомбинационной составляющей темнового тока и отсутствие утечки по границе раздела диэлектрик–полупроводник.

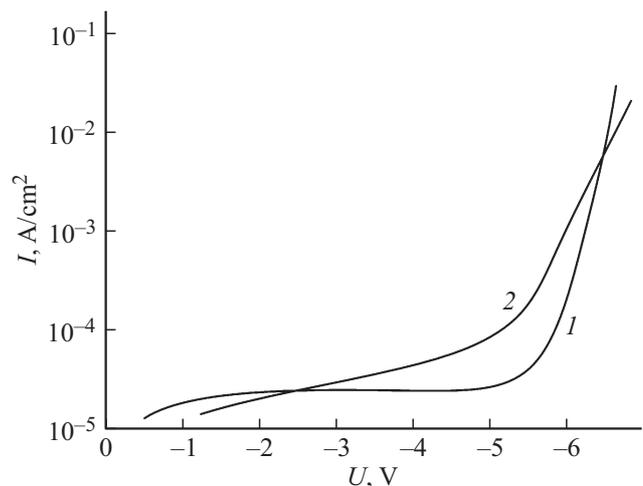


Рис. 3. Обратные ветви вольт-амперных характеристик p - n -фотодиодов, изготовленных на основе гетероструктур $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_z\text{P}_{1-y-z}/\text{InP}$. 1 — $x = 0.25$ mol. frac., $y = 0.10$ mol. frac., $z = 0.20$ mol. frac. ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$); 2 — $x = 0.62$ mol. frac., $y = 0.30$ mol. frac., $z = 0.50$ mol. frac. ($\lambda = 1.60 \mu\text{m}$).

Пороговая чувствительность P_{th} измерялась на частоте 800 Hz. Полоса пропускания измерительного тракта составляла 160 Hz. Минимально регистрируемая пороговая чувствительность $p-n$ -фотодиода не превышала 10^{-11} W при соотношении сигнал/шум 10. Измеренные значения P_{th} для изготовленных $p-n$ -фотодиодов находились в диапазоне $10^{-10}-10^{-11}$ W. Быстродействие фотодиодов оценивалось по обратной переходной характеристике (время спада фотосигнала). При подаче отрицательного смещения ~ 5 V на фотодиод время спада импульса фотоответа (от $0.9I_{max}$ до $0.1I_{max}$) составляло ~ 10 ns. Следует отметить, что время нарастания фотосигнала (прямая переходная характеристика) было сопоставимо с временем спада.

Таким образом, методом зонной перекристаллизации градиентом температуры впервые выращены изопериодические гетероструктуры $Ga_xIn_{1-x}Sb_yAs_zP_{1-y-z}/InP$ и на их основе изготовлены планарные $p-n$ -фотодиоды на длину волны 1.06 и 1.60 μm с достаточно высокой абсолютной спектральной чувствительностью и быстродействием.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Федеральному исследовательскому центру Южному научному центру РАН (№ 01201354240), а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-08-00108 А.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Beling A., Campbell J.C.* Photodetectors // Fibre optic communication / Eds H. Venghaus, N. Grote. Springer Ser. in Optical Sciences. Cham: Springer, 2017. V. 161. P. 249–290. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42367-8_6
- [2] *Гагис Г.С., Левин Р.В., Маричев А.Е., Пушный Б.В., Щеглов М.П., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю., Кудрявцев Ю.А., Власов А.С., Попова Т.Б., Чистяков Д.В., Кучинский В.И., Васильев В.И.* // ФТП. 2019. Т. 53. В. 11. С. 1512–1518. DOI: 10.21883/PJTF.2020.19.50044.18379 [Пер. версия: 10.1134/S106378261911006X].
- [3] *Watanabe K., Baba T.* // Opt. Express. 2019. V. 27. N 18. P. 24978–24988. <https://doi.org/10.1364/OE.27.024978>
- [4] *Sugiyama H., Uchida K., Han X., Periyannayagam G.K., Aikawa M., Hayasaka N., Shimomura K.* // J. Cryst. Growth. 2019. V. 507. P. 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.10.024>
- [5] *Jain N., Simon J., Schulte K.L., Friedman D.J., Diercks D.R., Packard C.E., Young D.L., Ptak A.J.* // IEEE J. Photovolt. 2018. V. 8. N 6. P. 1577–1583. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2865172>
- [6] *Watanabe K., Nomoto M., Nakamura F., Hachuda S., Sakata A., Watanabe T., Goshima Y., Baba T.* // Biosens. Bioelectron. 2018. V. 117. P. 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.05.059>
- [7] *Kuchinskii V.I., Vasil'ev V.I., Gagis G.S., Deryagin A.G., Dudelev V.V.* // Proc. of the 5th Int. Workshop on laser and fiber-optical networks modeling. Alushta, 2003. P. 76–78.
- [8] *Gagis G.S., Vasil'ev V.I., Deryagin A.G., Dudelev V.V., Maslov A.S., Levin R.V., Pushnyi B.V., Smirnov V.M., Sokolovskii G.S., Zegrya G.G., Kuchinskii V.I.* // Semicond. Sci. Technol. 2008. V. 23. N 12. P. 125026. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/23/12/125026>
- [9] *Cheetham K.J., Carrington P.J., Krier A., Patel I.I., Martin F.L.* // Semicond. Sci. Technol. 2012. V. 27. N 1. P. 015004. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/27/1/015004>
- [10] *Лозовский В.Н., Лунин Л.С., Попов В.П.* Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1987. 232 с.
- [11] *Кузнецов В.В., Когновицкая Е.А., Лунина М.Л., Рубцов Э.Р.* // ЖФХ. 2011. Т. 85. № 12. С. 2210–2215. [Пер. версия: <https://doi.org/10.1134/S003602441112020X>].
- [12] *Алфимова Д.Л., Лунин Л.С., Лунина М.Л., Казакова А.Е., Пащенко А.С., Чеботарев С.Н.* // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. № 12. С. 1245–1256. <https://doi.org/10.7868/S0002337X17120016> [Пер. версия: <https://doi.org/10.1134/S0020168517120019>].