

07

Тандемные GaInP/Ga(In)As-структуры для трехпереходных гибридных GaInP/Ga(In)As//Si солнечных элементов

© С.А. Минтаиров¹, В.М. Емельянов¹, Н.А. Калюжный¹, М.В. Нахимович¹, В.В. Олейник²,
Р.А. Салий¹, А.Ф. Скачков², Л.Н. Скачкова², М.З. Шварц¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² АО „Сатурн“, Краснодар, Россия

E-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 25 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 2 апреля 2025 г.

Принято к публикации 7 апреля 2025 г.

Проведены расчеты спектров внешнего квантового выхода фотоответа для GaInP-, Ga(In)As- и Si-субэлементов гибридных GaInP/Ga(In)As//Si солнечных элементов космического назначения. Установлено, что уменьшение толщин фотоактивных слоев GaInP-субэлемента с 550 до 290 nm и Ga(In)As-субэлемента с 3100 до 550 nm позволяет обеспечить согласование фотогенерированных токов на уровне $\sim 14.5 \text{ mA/cm}^2$, а замена Ga(In)As- на GaAs-субэлемент толщиной 600 nm — на уровне $\sim 14.9 \text{ mA/cm}^2$. Показано, что замена среднего и нижнего субэлементов в GaInP/Ga(In)As/Ge-структуре на GaAs и Si соответственно позволит повысить КПД от 29.4 до 30.8 % (AM0, 1 sun) при одновременном улучшении энергомассовых параметров и срока активной эксплуатации космических солнечных батарей.

Ключевые слова: многопереходный солнечный элемент, газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, КПД, спектральная характеристика, математическое моделирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.13.60703.20295

Солнечные элементы (СЭ), являющиеся основным источником энергии для космических аппаратов, используются в космосе уже более 60 лет [1]. Космические солнечные батареи (СБ) прошли путь от первых однопереходных СЭ на основе кремния с малой эффективностью преобразования [2] до высокоэффективных многопереходных (МП) СЭ на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 [3]. Основными задачами, решаемыми при разработке космических СБ, являются повышение эффективности преобразования солнечной энергии, улучшение энергомассовых параметров, а также повышение радиационной стойкости. Для космических условий (спектр AM0) на данный момент наилучшие лабораторные значения КПД составляют 33.7 % для инвертированных монокристаллических МП СЭ [4] и 35.8 % для пятипереходных СЭ, изготовленных методом склеивания („бондинга“) пластин [5]. Несмотря на высокие значения КПД МП СЭ, полученные в лабораторных условиях, основой серийного производства на данный момент являются GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ на базе согласованной по параметру решетки трехпереходной гетероструктуры. Такие СЭ имеют КПД $\sim 30\text{--}31\%$ (AM0, 1 sun) и демонстрируют высокую энергопроизводительность и долговременную надежность в космических миссиях [6–8].

В GaInP/Ga(In)As/Ge-структуре ширины запрещенной зоны каждого из субэлементов составляют 1.9, 1.42 и 0.67 eV соответственно, а толщины их слоев подбираются таким образом, чтобы обеспечить контролируемое рассогласование фотогенерированных токов (ФГТ) субэлементов. Это диктуется необходимостью обеспечения

требуемого уровня радиационной стойкости МП СЭ. Однако по причине невозможности полного согласования ФГТ, так как нижний субэлемент на основе германия генерирует почти в 2 раза больший ток, дальнейшее повышение КПД таких СЭ является затруднительным [9]. Решение данной проблемы лежит в плоскости новых конструктивных и структурных исполнений МП СЭ: метаморфные гетероструктуры [10], механическая стыковка СЭ [11], а также технология „бондинга“ пластин [12].

Успешные варианты „бондинга“ двухпереходных GaInP/GaAs- и GaInP/GaInAsP-тандемов с однопереходным Si СЭ за счет взаимной интердиффузии поверхностей полупроводников и сил Ван-дер-Ваальса были недавно продемонстрированы в работах [13,14] в конфигурации для наземного солнечного спектра AM1.5G. Кремниевый субэлемент, обладая большей по сравнению с германием шириной запрещенной зоны, при сравнимой освещенности (одна солнечная постоянная) обеспечивает генерацию значительно более высокого напряжения холостого хода $V_{oc} \approx 0.72\text{--}0.75 \text{ V}$ (для германия $V_{oc} \approx 0.25 \text{ V}$) [15], что в совокупности с оптимизацией GaInP/GaInAsP-гетероструктуры позволило продемонстрировать КПД СЭ на уровне 36.1 % для наземного спектра AM1.5G [14].

Если рассматривать гибридный GaInP/Ga(In)As//Si СЭ с точки зрения применения в космических СБ, то потенциальные преимущества такой конструкции заключаются прежде всего в лучших энергомассовых параметрах солнечных панелей, так как плотность кремния в 2 раза меньше плотности германия.

Настоящая работа посвящена расчетам спектральных характеристик GaInP/Ga(In)As//Si гибридных СЭ

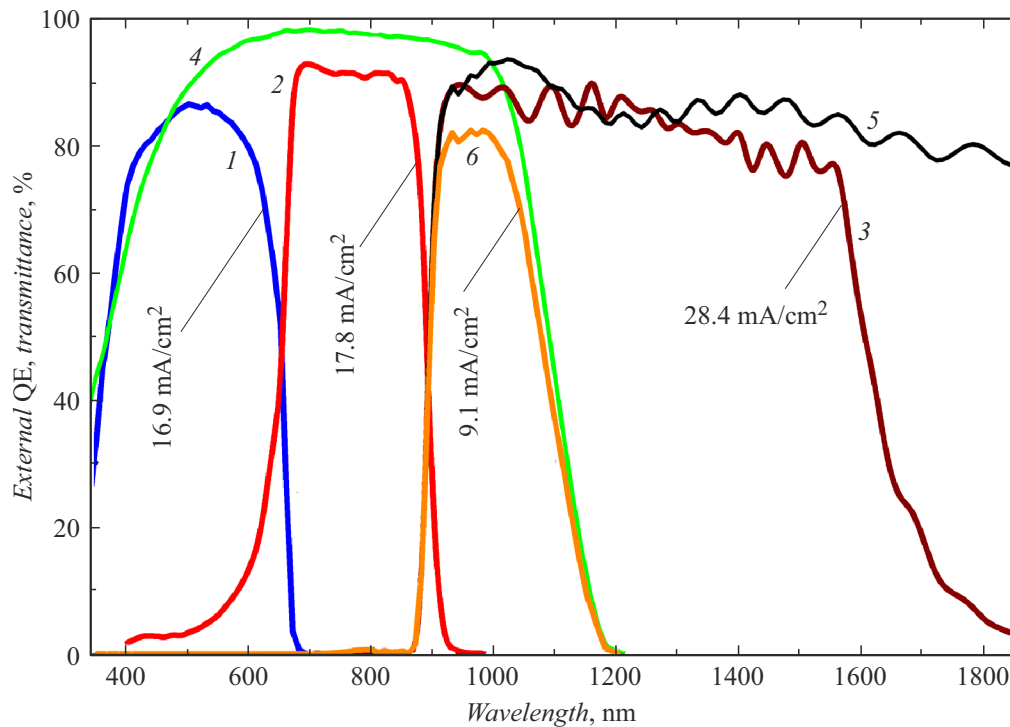


Рис. 1. Измеренные спектры внешнего квантового выхода фотоответа для субэлементов GaInP (линия 1), Ga(In)As (линия 2) и Ge (линия 3) GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ, для Si СЭ (линия 4), а также расчетные спектры пропускания GaInP/Ga(In)As-тандема (линия 5) и внешнего квантового выхода фотоответа Si-субэлемента (линия 6) гибридного GaInP/Ga(In)As//Si СЭ. Толщины фотоактивных слоев составляют: GaInP — 550 nm, Ga(In)As — 3100 nm.

с целью оптимизации их структуры и обеспечения согласования ФГТ. Математическое моделирование спектральных характеристик GaInP/Ga(In)As-тандема и Si-субэлемента проводилось при помощи методики, описанной в [16], учитывающей распространение света в слоистой среде.

На рис. 1 представлены спектральные характеристики внешнего квантового выхода (ВКВ) фотоответа субэлементов GaInP/Ga(In)As/Ge трехпереходного СЭ (линии 1–3 соответственно) с КПД 29.4% (AM0, 1 sun). Гетероструктура такого СЭ была выращена методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений с использованием промышленного горизонтального реактора планетарного типа. ФГТ субэлементов GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ для спектра AM0 составляют 16.9, 17.8 и 28.4 mA/cm² соответственно. Ввиду того что в монолитной структуре субэлементы соединены последовательно, общий ФГТ МП СЭ равен наименьшему из токов субэлементов, а общее напряжение — сумме напряжений субэлементов. Таким образом, увеличение ширины запрещенной зоны нижнего субэлемента позволит увеличить напряжение МП СЭ без потери ФГТ.

В рассматриваемом варианте гибридного GaInP/Ga(In)As//Si СЭ структура тандема GaInP/Ga(In)As должна изготавливаться посредством инвертированного роста (слои выращиваются в обратной последовательности) с „жертвенным“ AlGaAs-слоем между ростовой подложкой и GaInP/Ga(In)As-гетероструктурой. Для со-

единения GaInP/Ga(In)As- и Si-структур будет использоваться технология прижимного „бондинга“ с последующим удалением ростовой подложки GaAs и „жертвенного“ AlGaAs-слоя. Для моделирования спектров ВКВ фотоответа нижнего (Si) субэлемента рассчитывались спектры пропускания GaInP/Ga(In)As-тандема без подложки (рис. 1, линия 5), и затем полученные спектры пропускания умножались на спектр ВКВ фотоответа кремниевого СЭ.

Наиболее перспективными для создания GaInP/Ga(In)As//Si гибридных СЭ являются гетеропереходные кремневые СЭ Si-HJT (Silicon HeteroJunction Technology [15]), преобразующие фотоны с длиной волны вплоть до 1200 nm (рис. 1, линия 4). Результаты моделирования ВКВ фотоответа при использовании Si-HJT в качестве нижнего субэлемента гибридного GaInP/Ga(In)As//Si СЭ (рис. 1, линия 6) показали, что в случае поглощения верхним тандемом всех фотонов с энергией больше ширины запрещенной зоны Ga(In)As не удастся достичь согласования ФГТ субэлементов, а ток Si-субэлемента (9.1 mA/cm²) оказывается в 2 раза ниже в сравнении с субэлементами широкозонной пары.

Очевидно, что использование тонкого частично прозрачного в диапазоне длин волн 700–900 nm Ga(In)As-субэлемента позволит пропустить большее количество фотонов солнечного спектра к Si-субэлементу. Соответствующая оптимизация толщин фотоактивных слоев затронет и GaInP-субэлемент для обеспечения со-

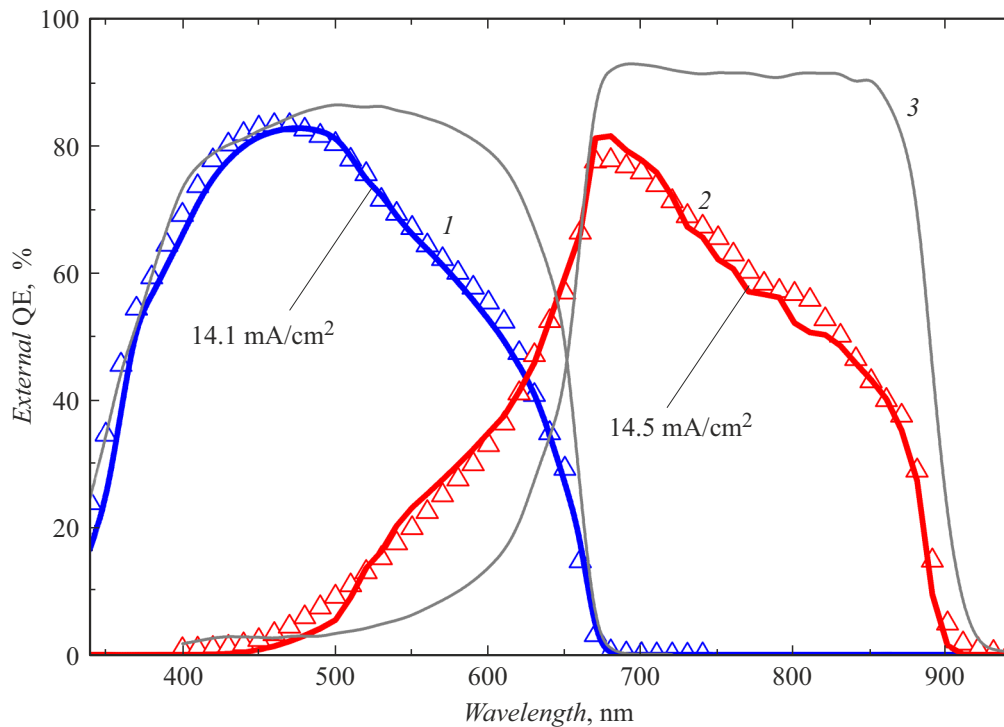


Рис. 2. Изменение спектров внешнего квантового выхода фотоответа для субэлементов GaInP (символы и линия 1) и Ga(In)As (символы и линия 2) GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ (линии — расчет, символы — экспериментальные данные) при уменьшении их толщины (GaInP с 550 до 290 nm, Ga(In)As с 3100 до 550 nm) относительно СЭ, спектры ВКВ фотоответа которого представлены на рис. 1 (линии 3).

гласования ФГТ всех трех субэлементов проектируемого гибридного GaInP/Ga(In)As/Si СЭ.

В результате моделирования была предложена структура GaInP/Ga(In)As-тандема с уменьшенными толщинами фотоактивных слоев субэлементов: для GaInP — с 550 до 290 nm, для Ga(In)As — с 3100 до 550 nm. Для экспериментальных образцов, изготовленных на основе утоненной GaInP/Ga(In)As/Ge-структуры, ФГТ GaInP- и Ga(In)As-субэлементов составили 14.1 и 14.5 mA/cm² (спектр AM0) соответственно, что достаточно хорошо согласуется с модельными оценками (рис. 2). Расчетные зависимости спектра пропускания тонкого GaInP/Ga(In)As-тандема позволили прогнозировать ФГТ Si-субэлемента на уровне 14.8 mA/cm² (рис. 3).

При „бондинге“ возможно возникновение дополнительных оптических потерь для излучения, проходящего через GaInP/Ga(In)As-тандем к Si-субэлементу. Повышение ФГТ кремниевого субэлемента возможно при использовании GaInP/GaAs-тандема, структуру которого можно выращивать на подложках GaAs псевдоморфно, т.е. с сохранением параметра решетки (в отличие от GaInP/Ga(In)As-тандема, согласованного с Ge при добавлении 1 % индия в Ga(In)As и GaInP). В варианте гибридного GaInP/GaAs/Si СЭ с тонкими субэлементами GaInP (290 nm) и GaAs (600 nm) расчетные ФГТ составили 14.4/14.5/15.7 mA/cm² соответственно (рис. 3).

Так как КПД СЭ прямо пропорционален произведению ФГТ и V_{oc} , была проведена оценка КПД проектиру-

емого гибридного СЭ. Экспериментальное значение V_{oc} GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ при 1 sun составляет ~ 2.69 V. Замена Ge на Si добавит 0.47 V в напряжение холостого хода. Увеличение ширины запрещенной зоны фотоактивных слоев верхнего тандема обеспечит дополнительную прибавку напряжения на 40 mV. Таким образом, в GaInP/GaAs/Si СЭ ожидаемое V_{oc} составит 3.21 V, а ФГТ при полном согласовании субэлементов — 14.9 mA/cm² (значение рассчитано как среднее арифметическое ФГТ субэлементов). Это позволяет прогнозировать КПД такого гибридного СЭ на уровне ~ 30.8 % (AM0, 1 sun) при одновременном улучшении энергомассовых параметров прибора.

Важно отметить, что деградация СЭ космического назначения за счет воздействия радиационного облучения вызвана уменьшением диффузионных длин неосновных носителей заряда в фотоактивных слоях субэлементов СЭ и, как следствие, уменьшением ФГТ субэлементов из-за ухудшения сбора фотогенерированных носителей. Значительное уменьшение толщин фотоактивных слоев в предлагаемой конструкции гибридных GaInP/GaAs/Si СЭ помимо увеличения КПД и энергомассовых параметров также обеспечит улучшение радиационной стойкости таких СЭ и сроков активной эксплуатации СБ на их основе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

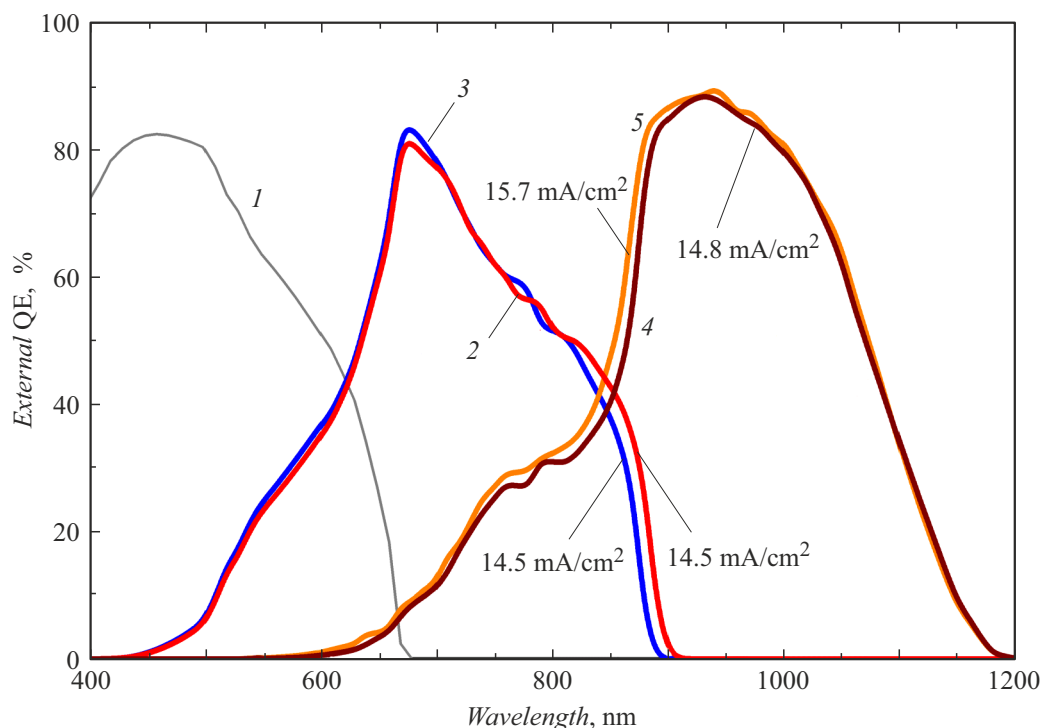


Рис. 3. Расчетные спектры внешнего квантового выхода фототовета субэлементов GaInP (линия 1), Ga(In)As (линия 2), GaAs (линия 3), а также субэлементов на основе Si: GaInP/Ga(In)As//Si гибридного СЭ (линия 4) и GaInP/GaAs//Si гибридного СЭ (линия 5). Толщины фотоактивных слоев субэлементов GaInP/GaAs//Si СЭ составляют: GaInP — 290 nm, GaAs — 600 nm.

Список литературы

- [1] D.J. Flood, *Mod. Phys. Lett. B*, **15**, 561 (2001). DOI: 10.1142/S0217984901002038
- [2] K. Yukinori, N. Shoichi, T. Shinya, *Vacuum*, **42**, 1035 (1991). DOI: 10.1016/0042-207X(91)91251-I
- [3] T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, *Solar Energy*, **85** (8), 1580 (2011). DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.002
- [4] P. Patel, D. Aiken, D. Chumney, A. Cornfeld, Y. Lin, C. Mackos, J. McCarty, N. Miller, P. Sharps, M. Stan, in *2012 IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC)* (IEEE, 2012), part 2, p. 1. DOI: 10.1109/PVSC-Vol2.2012.6656717
- [5] P.T. Chiu, D.C. Law, R.L. Woo, S.B. Singer, D. Bhusari, W.D. Hong, A. Zakaria, X.Q. Liu, N.H. Karam, in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC)* (IEEE, 2015), p. 1. DOI: 10.1109/PVSC.2015.7355673
- [6] R. Cariou, J. Benick, F. Feldmann, O. Hohn, H. Hauser, P. Beutel, N. Razek, M. Wimplinger, B. Bläsi, D. Lackner, M. Hermle, G. Siefer, S.W. Glunz, A.W. Bett, F. Dimroth, *Nat. Energy*, **3** (4), 326 (2018). DOI: 10.1038/s41560-018-0125-0
- [7] M. Stan, D. Aiken, B. Cho, A. Cornfeld, J. Diaz, V. Ley, A. Korostyshevsky, P. Patel, P. Sharps, T. Varghese, *J. Cryst. Growth*, **310** (23), 5204 (2008). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2008.07.024
- [8] R.R. King, N.H. Karam, J.H. Ermer, M. Haddad, P. Colter, T. Isshiki, H. Yoon, H.L. Cotal, D.E. Joslin, D.D. Krut, R. Sudharsanan, K. Edmondson, B.T. Cavicchi, D.R. Lillington, in *2000 IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (IEEE, 2000)*, p. 998. DOI: 10.1109/PVSC.2000.916054
- [9] J.F. Geisz, S. Kurtz, M.W. Wanlass, J.S. Ward, A. Duda, D.J. Friedman, J.M. Olson, W.E. McMahon, T.E. Moriarty, J.T. Kiehl, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 023502 (2007). DOI: 10.1063/1.2753729
- [10] J.F. Geisz, D.J. Friedman, J.S. Ward, A. Duda, W.J. Olavarria, T.E. Moriarty, J.T. Kiehl, M.J. Romero, A.G. Norman, K.M. Jones, *Appl. Phys. Lett.*, **93** (12), 123505 (2008). DOI: 10.1063/1.2988497
- [11] Y.C. Kao, H.M. Chou, S.C. Hsu, A. Lin, C.C. Lin, Z.H. Shih, C.L. Chang, H.F. Hong, R.H. Horng, *Sci. Rep.*, **9** (1), 4308 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-40727-y
- [12] F. Dimroth, M. Grave, P. Beutel, U. Fiedeler, C. Karcher, T.N.D. Tibbits, E. Oliva, G. Siefer, M. Schachtner, A. Wekkeli, A.W. Bett, R. Krause, M. Piccin, N. Blanc, C. Drazek, E. Guiot, B. Ghyselen, T. Salvétat, A. Tauzin, T. Signamarcheix, A. Dobrich, T. Hannappel, K. Schwarzburg, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **22** (3), 277 (2014). DOI: 10.1002/pip.2475
- [13] P. Schygulla, R. Müller, D. Lackner, O. Höhn, H. Hauser, B. Bläsi, F. Predan, J. Benick, M. Hermle, S. Glunz, F. Dimroth, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **30**, 869 (2022). DOI: 10.1002/pip.3503
- [14] P. Schygulla, R. Müller, O. Höhn, M. Schachtner, D. Chojniak, A. Cordaro, S.W. Tabernig, B. Bläsi, A. Polman, G. Siefer, D. Lackner, F. Dimroth, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **33** (1), 100 (2025). DOI: 10.1002/pip.3769
- [15] H. Lin, M. Yang, X. Ru, G. Wang, S. Yin, F. Peng, C. Hong, M. Qu, J. Lu, L. Fang, C. Han, P. Procel, O. Isabella, P. Gao, Z. Li, X. Xu, *Nat. Energy*, **8**, 789 (2023). DOI: 10.1038/s41560-023-01255-2
- [16] С.А. Минтаиров, В.М. Андреев, В.М. Емельянов, Н.А. Калужный, Н.К. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов, *ФТП*, **44** (8), 1118 (2010). [S.A. Mintairov, V.M. Andreev, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, N.K. Timoshina, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov, *Semiconductors*, **44** (8), 1084 (2010). DOI: 10.1134/S1063782610080233].