УДК 621.315.592

Фотоэлектрический преобразователь лазерного излучения $\lambda = 1064$ нм на основе GaInAsP/InP

© К.А. Гаврилов[1], В.В. Евстропов[1], Н.А. Калюжный[1], М.А. Минтаиров[1], С.А. Минтаиров[1,¶], А.М. Надточий[2], М.В. Нахимович[1], Е.В. Пирогов[2], Р.А. Салий[1], М.З. Шварц[1]

[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
[¶] E-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 30 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 8 сентября 2025 г.
Принята к публикации 11 ноября 2025 г.

Методом металлорганической газофазной эпитаксии выращены слои InAsP и GaInAsP на подложках InP. Проведенные исследования методами фотолюминесценции, рентгеновской дифрактометрии, а также энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии позволили определить условия выращивания слоев $Ga_{0.26}In_{0.74}As_{0.5}P_{0.5}$ с параметром рассогласования $\Delta a/a = 2000$ ppm и шириной запрещенной зоны 1.04 эВ (край поглощения 1190 нм). На основе таких слоев была выращена структура фотопреобразователя лазерного излучения для $\lambda = 1064$ нм. Проведенные измерения и расчет позволяют спрогнозировать значение кпд такой структуры на уровне 40 % при плотности падающей мощности лазерного излучения с $\lambda = 1064$ нм до 30–50 Вт/см^2 и 46 % в случае увеличения ширины запрещенной зоны поглощающих слоев GaInAsP до 1.16 эВ (край поглощения 1070 нм).

Ключевые слова: фотопреобразователь лазерного излучения, МОСГФЭ, спектральная характеристика, математическое моделирование.

DOI: 10.61011/FTP.2025.08.62185.7973

В последнее время задача передачи энергии на большие расстояния посредством лазерного луча становится все более актуальной и находит целый ряд практических применений. Для этого, в частности, оптимально подходят мощные и эффективные твердотельные лазеры на основе иттриевого граната с длиной волны генерации $\lambda = 1064$ нм. Фотопреобразователь лазерного излучения (ФПЛИ), рассчитанный на $\lambda = 1064$ нм, был впервые создан 1981 году [1]. Он представлял собой гетероструктуру InP/GaInAsP/InP, выращенную методом жидкофазной эпитаксии, и имел кпд ~ 43 % при падающей мощности лазерного излучения 4.85 мВт [1]. В то время общий уровень технологий не позволил реализовать концепцию лазерной беспроводной передачи энергии, которая начала активно развиваться только в начале XXI столетия в связи с проектами NASA [2]. На сегодняшний день лучший ФПЛИ на основе GaInAsP имеет кпд ~ 41 % при падающей мощности излучения 1.67 Вт [3]. Также для ФПЛИ с $\lambda = 1064$ нм были предложены кремниевые структуры, и была продемонстрирована эффективность преобразования ~ 38.8 % (плотность падающей мощности 1.3 Вт/см^2) [4], однако этот результат был достигнут за счет очень сложной процедуры текстурирования поверхности, а пиковая мощность преобразуемого излучения была недостаточной для систем беспроводной передачи энергии. Следует отметить, что на сегодняшний день разработана технология метаморфного InGaAs ФПЛИ, которая позволяет получать кпд до 50 % при плотности падающей мощности > 10 Вт/см^2 [5,6]. При этом технология монолитного согласованного по параметру решетки GaInAsP/InP ФПЛИ имеет больший потенциал, чем технология метаморфных InGaAs ФПЛИ, вследствие присущих совершенным кристаллам меньших по сравнению с метаморфными слоями токов утечки.

Теоретические оценки кпд для ФПЛИ на основе GaInAsP с шириной запрещенной зоны $E_g = 1.16$ эВ (соответствует $\lambda = 1064$ нм) достигают 75 % при плотности фототока 103 А/см^2, что эквивалентно мощности падающего излучения 1.16 кВт/см^2 [7]. Таким образом, исследования с целью создания высокоэффективных ФПЛИ на основе GaInAsP являются актуальными.

В данной работе создана гетероструктура ФПЛИ на основе системы материалов GaInAsP/InP. Эпитаксиальный рост проводился по технологии металлорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) с использованием горизонтального реактора пониженного давления. В качестве источников атомов V группы использовались гидриды фосфора (PH_3) и мышьяка (AsH_3). В качестве источников атомов III группы использовались тримети-

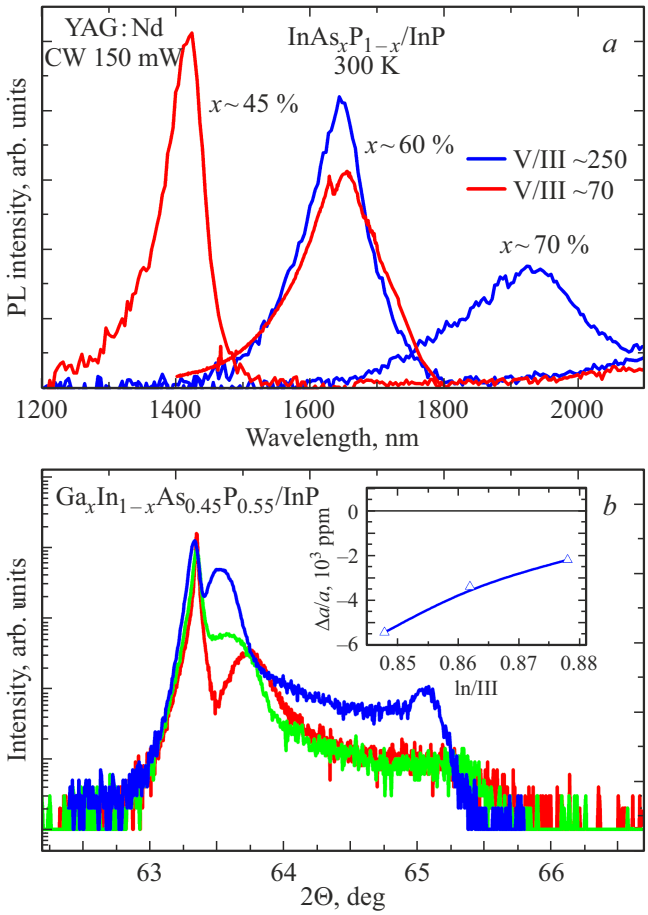

Рис. 1. *a* — спектры фотолюминесценции при комнатой температуре для слоев InAsP различного состава, выращенных на подложках InP при соотношении атомов V и III групп в газовой фазе ~ 70 (красные линии) и ~ 250 (синие линии); *b* — рентгеновские кривые качания слоев $Ga_xIn_{1-x}As_{0.45}P_{0.55}$, выращенных на подложках InP при различных отношениях атомов индия к атомам III группы в газовой фазе (на вставке зависимость рассогласования слоев $Ga_xIn_{1-x}As_{0.45}P_{0.55}$ от соотношения In/III).

лгалия (TMGa) и триметилиндия (TMIn), в качестве источника донорной примеси использовался силан (SiH_4), акцепторной — диэтилцинк (DEZn).

Были проведены эпитаксиальные эксперименты по выращиванию слоев $InAs_xP_{1-x}$ на подложках InP при отношении мольных потоков атомов V и III групп в газовой фазе ~ 70 и 260. Положение пиков в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) позволило рассчитать концентрации мышьяка в слоях (рис. 1, *a*) с использованием данных о параметрах зон $A^{III}B^{V}$ полупроводников и их твердых растворов [8]. Важно отметить, что слои со схожим составом имели бóльшую интенсивность ФЛ пика при высоком отношении V/III (рис. 1, *a*). Слои $InAs_{0.45}P_{0.55}$ были получены при отношении мольных потоков атомов мышьяка к общему потоку атомов V группы (As/V), равном 0.043. На порядок большая концентрация атомов мышьяка в твердой фазе по сравнению с газовой объясняется тем, что при температурах роста фосфин разлагается не полностью, что снижает концентрацию атомарного фосфора над ростовой поверхностью.

Были проведены эксперименты по выращиванию слоев $Ga_xIn_{1-x}As_{0.45}P_{0.55}$ на подложках InP при различных отношениях мольных потоков атомов индия к общему потоку атомов III группы в газовой фазе (In/III). Измерения рентгеновских (XRD) кривых качания (рис. 1, *b*) позволили установить зависимость рассогласования эпитаксиальных слоев и подложки ($\Delta a/a$) от отношения In/III (рис. 1, *b*, см. вставку) и получить слои, рассогласованные с подложкой всего на -2000 ppm. Данные, представленные в работе [8], позволяют оценить состав твердого раствора ($\Delta a/a = -2000$ ppm) как $Ga_{0.23}In_{0.77}As_{0.45}P_{0.55}$ с шириной запрещенной зоны 1.06 эВ (край поглощения 1170 нм).

Исследования слоя с $\Delta a/a = -3400$ ppm (рис. 2, *b*, зеленая линия) методом электронной микроскопии показали, что слой имел рельефную поверхность из-за релаксации упругих напряжений (рис. 2, *a*).

Для уточнения составов в выращенных слоях $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ были проведены измерения слоя с $\Delta a/a = -3400$ ppm (рис. 2, *b*, зеленая линия), соответствующего, согласно предыдущим экспериментам, твердому раствору $Ga_{0.25}In_{0.75}As_{0.45}P_{0.55}$, методом энергодисперсионной рентгеновской (EDX) спектроскопии (рис. 2, *b*). Уточненные при помощи рентгеновской спектроскопии концентрации атомов в слое соответствуют твердому раствору $Ga_{0.28}In_{0.72}As_{0.5}P_{0.5}$, имеющему расчетное рассогласование $\Delta a/a = -3500$ ppm. Таким образом, можно говорить о хорошем согласовании экспериментальных данных, полученных из исследований ФЛ, XRD и EDX методами. Уточненные методом EDX концентрации атомов мышьяка и фосфора позволили определить твердый раствор с $\Delta a/a = -2000$ ppm (рис. 2, *b*, синяя линия) как $Ga_{0.26}In_{0.74}As_{0.5}P_{0.5}$ с шириной запрещенной зоны 1.05 эВ (край поглощения 1190 нм).

На основе данного слоя была выращена структура ФПЛИ, состоящая из последовательно осажденных на подложку *p*-InP, выполняющую роль тыльного потенциального барьера, слоев: *p*-$Ga_{0.26}In_{0.74}As_{0.5}P_{0.5}$ базы толщиной 4 мкм, легированной атомами цинка, *n*-$Ga_{0.26}In_{0.74}As_{0.5}P_{0.5}$ эмиттера толщиной 200 нм, легированного атомами кремния, *n*-InP широкозонного окна толщиной 150 нм и n^{++}-InGaAs контактного слоя толщиной 300 нм. Из выращенной структуры был изготовлен ФПЛИ по упрощенной технологии без просветляющего покрытия. Для этого на тыльную и лицевую стороны структуры были нанесены контакты электрохимическим осаждением никеля, а в области, не закрытой контактом, слой n^{++}-InGaAs был удален химическим травлением.

Измеренный спектр внешней квантовой эффективности (ВКЕ) ФПЛИ в диапазоне 1000–1100 нм не превышает 50–55 % (рис. 3, *a*, красные треугольники), а на длине волны 1060 нм ВКЕ составляет 52 % (соответствует спектральной чувствительности (*SR*) 0.45 А/Вт), что в первую очередь связано с отсутствием просветляющего

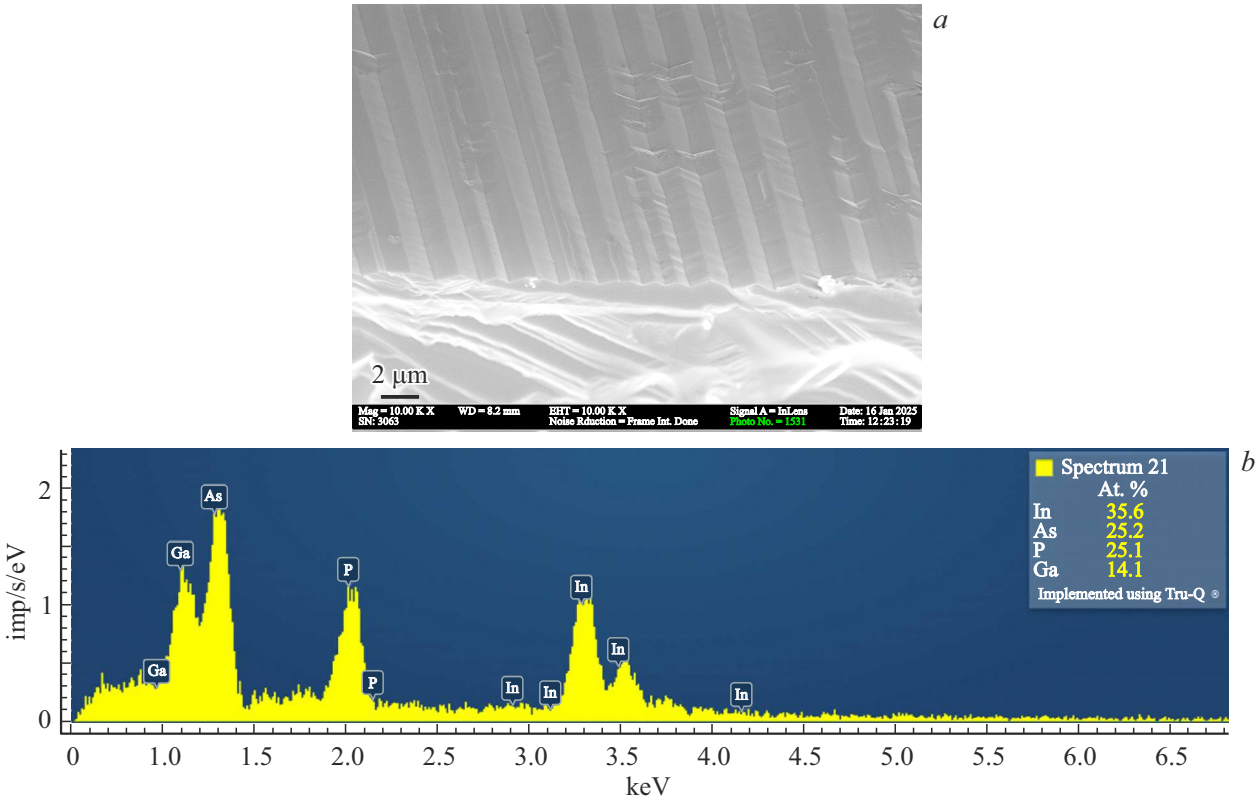

Рис. 2. *a* — изображение поверхности образца слоя $Ga_{0.28}In_{0.72}As_{0.5}P_{0.5}$, полученное методом электронной микроскопии; *b* — энергодисперсионный спектр возбужденного рентгеновского излучения слоя $Ga_{0.28}In_{0.72}As_{0.5}P_{0.5}$.

покрытия. Край поглощения хорошо соответствует расчетному значению ширины запрещенной зоны поглощающих слоев $Ga_{0.26}In_{0.74}As_{0.5}P_{0.5}$ (рис. 3, *a*). Для оценки коэффициента собирания фотогенерированных носителей из фотоактив методике, описанной в работе [9].

Расчетный спектр ВКЕ (рис. 3, *a*, красная линия) хорошо согласуется с экспериментальным при значениях диффузионных длин неосновных носителей заряда: $L_p = 240$ нм, $L_n = 1800$ нм для эмиттера и базы соответственно. Низкое значение диффузионной длины в базе (более чем в 2 раза меньше толщины) обусловливает неполное собирание фотогенерированных носителей и, вероятно, связано с дефектами за счет рассогласования фотоактивных слоев с подложкой. Расчетный спектр внутренней квантовый эффективности (рис. 3, *a*, синяя линия) не превышает 80–85 %, и на длине волны 1060 нм квантовая эффективность составляет 72 % (соответствует $SR = 0.61$ А/Вт).

Для определения кпд ФПЛИ была рассчитана его вольт-амперная характеристика (ВАХ) с использованием модели токового инварианта [10], позволяющей дать надежную (модель экспериментально подтверждена) оценку для токов насыщения двухдиодной модели фотопреобразователей [11], зная ширину запрещенной зоны поглощающего материала. Такая ВАХ приведена на рис. 3, *b*, а плотности токов насыщения составили: $J_{01} = 7 \cdot 10^{-13}$ А/см^2 и $J_{02} = 2 \cdot 10^{-7}$ А/см^2 для диффузионного и рекомбинационного механизмов протекания темнового тока соответственно.

Изготовление ФПЛИ из выращенной структуры с нанесением лицевой контактной сетки приведет к появлению последовательного сопротивления прибора ~ 0.01 Ом · см [12,13]. Это позволяет оценить кпд структуры без просветляющего покрытия (при $SR = 0.45$ А/Вт) на уровне 29 % при преобразовании лазерного излучения с $\lambda = 1064$ нм и плотностью падающей мощности 30–50 Вт/см^2 (рис. 4, черная линия), а нанесение просветляющего покрытия позволит повысить кпд (рис. 4, зеленая линия) до ~ 40 % (при $SR = 0.61$ А/Вт).

Дальнейшего увеличения кпд ФПЛИ можно добиться за счет полного согласования по параметру решетки поглощающих слоев GaInAsP с подложкой. Это должно привести к увеличению диффузионных длин неосновных носителей заряда и повышению SR. Кроме того, увеличение кпд произойдет при условии увеличения ширины запрещенной зоны поглощающих слоев GaInAsP до 1.16 эВ, что позволит получить меньшие токи насыщения и, как следствие, большее значение напряжения холостого хода. Величины токов насыщения были оценены по методу инварианта. Для материала с $E_g = 1.16$ эВ плотности токов насыщения составили: $J_{01} = 1 \cdot 10^{-14}$ А/см^2 и $J_{02} = 2 \cdot 10^{-8}$ А/см^2 для диффузионного и рекомбинационного механизмов соответствен-

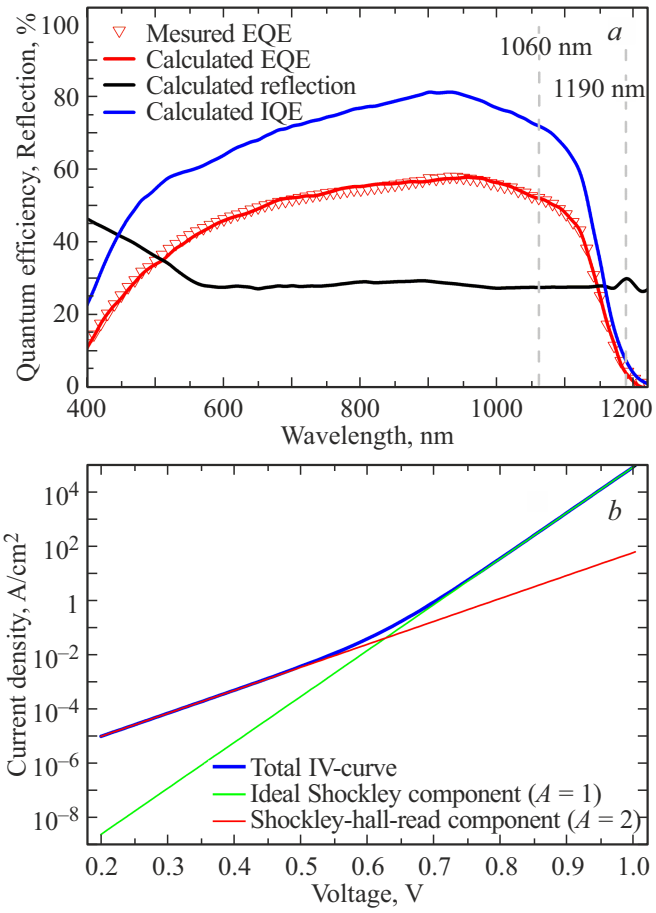

Рис. 3. *a* — измеренный спектр ВКЕ ФПЛИ на основе $Ga_{0.26}In_{0.74}As_{0.5}P_{0.5}$ (красные треугольники), а также расчетные спектры ВКЕ (красная линия), отражения (черная линия) и внутренней квантовой эффективности (синяя линия); *b* — рассчитанная по методу токового инварианта темновая безрезистивная ВАХ ФПЛИ на основе $Ga_{0.26}In_{0.74}As_{0.5}P_{0.5}$.

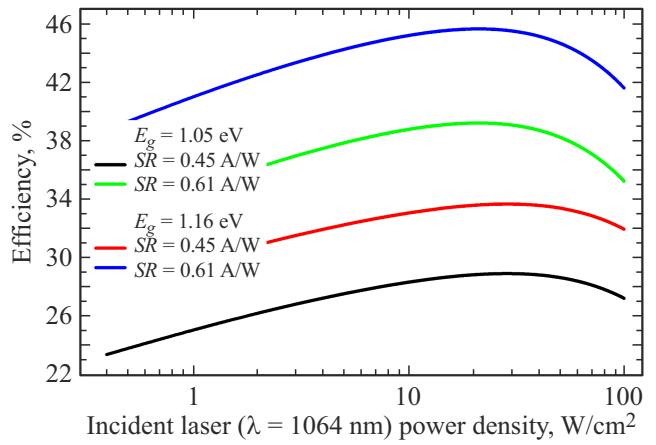

Рис. 4. Расчетные зависимости кпд ФПЛИ на основе $Ga_{0.26}In_{0.74}As_{0.5}P_{0.5}$ от плотности падающей мощности лазерного излучения с $\lambda = 1064$ нм при последовательном сопротивлении 0.01 Ом · см: черная линия — $E_g = 1.05$ эВ, $SR = 0.45$ А/Вт; зеленая линия — $E_g = 1.05$ эВ, $SR = 0.61$ А/Вт; красная линия — $E_g = 1.16$ эВ, $SR = 0.45$ А/Вт; синяя линия — $E_g = 1.16$ эВ, $SR = 0.61$ А/Вт.

но. При этом если сохранить структуру ФПЛИ и полагать, что диффузионные длины неосновных носителей зарядов не изменятся при выращивании поглощающего слоя $E_g = 1.16$ эВ (т. е. сохранится спектр внешнего квантового выхода), то расчетные значения кпд составляют 34 % при $SR = 0.45$ А/Вт, что соответствует отсутствию просветляющего покрытия (рис. 4, красная линия) и 46 % при $SR = 0.61$ А/Вт, что соответствует случаю наличия просветляющего покрытия (рис. 4, синяя линия).

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема FFUG-2024-0026). А.М. Надточий благодарит за финансовую поддержку Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2023-0010), Е.В. Пирогов благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM- 2023-0006).

Благодарности

Авторы выражают благодарность И.П. Сошникову за измерения методами электронной микроскопии и EDX.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] H.D. Law, W.W. Ng, K. Nakano, P.D. Dapkus, D.R. Stone. IEEE Electron Dev. Lett., **2** (2), 26 (1981). DOI: 10.1109/EDL.1981.25327
[2] H. Liu, Y. Zhang, Y. Hu, Z. Tse, J. Wu. Power Electron. Drives, **6** (41), 167 (2021). DOI: 10.2478/pead-2021-0010
[3] J.J. Yin, Y.R. Sun, A.C. Wang, S.Z. Yu, J.S. Wang, Q.X. Fu, J. Qin, Y.H. Han, W. Zhang, S.M. Zhang, C. Xue, J.R. Dong. IEEE Electron Dev. Lett., **43** (8), 1291 (2022). DOI: 10.1109/LED.2022.3183833
[4] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham. IEEE Electron Dev. Lett., **13**, 317 (1992).
[5] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **217**, 110710 (2020). DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110710
[6] C. Pellegrino, H. Helmers, J. Ohlmann, O. Höhn, D. Lackner. In: 2023 13th Eur. Space Power Conf. (ESPC), Elche, Spain: IEEE, Oct. 2023, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ESPC59009.2023.10298134
[7] В.М. Андреев. Соврем. электрон., **6**, 28 (2014).
[8] I. Vurgaftmana, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys., **89** (11), 5815 (2001).
[9] С.А. Минтаиров, В.М. Андреев, В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, Н.К. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов. ФТП, **44** (8), 1118 (2010).

[10] M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **264**, #112619 (2024). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112619
[11] P. Wurfel. *Physics Of Solar Cells: From Principles To New Concepts* (Weinheim, Wiley-VCH, 2005).
[12] М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов. ФТП, **46** (8), 1074 (2012).
[13] H. Helmers, E. Oliva, M. Schachtner, G. Mikolasch, L.A. Ruiz-Preciado, A. Franke, J. Bartsch. Progr. Photovolt.: Res. Appl., **32**, 636 (2024).

Редактор А.Н. Смирнов

Photoelectric laser radiation converter $\lambda = 1064$ nm based on GaInAsP/InP

K.A. Gavrilov[1], V.V. Evstropov[1], N.A. Kalyuzhny[1], M.A. Mintairov[1], S.A. Mintairov[1], A.M. Nadtochiy[2], M.V. Nakhimovich[1], E.V. Pirogov[2], R.A. Salii[1], M.Z. Schwartz[1]

[1] Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
[2] Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract InAsP and GaInAsP layers were grown on InP substrates using the metal-organic vapor-phase epitaxy method. The studies conducted using the photoluminescence, X-ray diffractometry, and energy-dispersive X-ray spectroscopy methods allowed us to determine the conditions for growing $Ga_{0.26}In_{0.74}As_{0.5}P_{0.5}$ layers with $\Delta a/a = 2000$ ppm and a band gap of 1.04 eV (absorption edge 1190 nm). Based on these layers, a laser radiation photoconverter structure for $\lambda = 1064$ nm was grown. The measurements and calculations made it possible to predict the efficiency of such a structure at a level of 40 % at a laser radiation incident power density of $\lambda = 1064$ nm up to 30–50 W/cm^2.