

07

Фотопреобразователи лазерного излучения для диапазона длин волн 1050–1200 nm на основе гетероструктуры InGaAsP/InP, выращенной методом газовой эпитаксии

© С.А. Минтаиров¹, Н.А. Калужный¹, А.В. Малевская¹, А.М. Надточий², М.В. Нахимович¹, Е.В. Пирогов², Р.А. Салий¹, К.А. Гаврилов¹, В.С. Эполетов¹, М.З. Шварц¹

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

² Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 17 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 2 июня 2026 г.

Принято к публикации 9 июня 2026 г.

Исследовано осаждение согласованных с InP-подложкой эпитаксиальных слоев InGaAsP с краем поглощения в области 1260 nm методом металлоорганической газовой эпитаксии. На основе таких слоев созданы фотопреобразователи лазерного излучения, эффективно работающие в диапазоне длин волн 1050–1200 nm. Фотопреобразователи продемонстрировали КПД при преобразовании лазерной линии 1175 nm на уровне 51.4 % при плотности падающей мощности порядка 5 W/cm², а также лазерной линии 1064 nm на уровне 47.2 % при плотности падающей мощности порядка 5.5 W/cm².

Ключевые слова: фотопреобразователь, лазерное излучение, металлоорганическая газовая эпитаксия, КПД, спектральная чувствительность.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.18.63540.20738

Беспроводная передача энергии с использованием лазерного луча в качестве носителя энергии становится в последнее время все более востребованным направлением прикладной физики, что порождает увеличение количества исследований в этой области. Важным преимуществом такой передачи энергии является возможность обеспечения питания систем, удаленных на большие расстояния от источника питания [1,2]. Благодаря возможности обеспечения высокой плотности мощности лазерного излучения передача энергии посредством лазерного излучения хорошо подходит для питания космических аппаратов [3–5], беспилотных летательных аппаратов [6,7] и устройств, работающих на других планетах [8].

Выбор длины волны лазерного излучения имеет решающее значение для обеспечения эффективности работы систем передачи энергии, и для этих целей очень хорошо подходит ближний инфракрасный диапазон длин волн, в частности 1000–1200 nm, из-за низких потерь на поглощение и рассеяние в атмосфере, а также по причине наличия эффективных лазерных источников [7]. В системах беспроводной передачи энергии фотопреобразователь лазерного излучения (ФПЛИ) является важнейшим компонентом, определяющим ее общую эффективность.

Для ФПЛИ ближнего инфракрасного диапазона основными поглощающими материалами являются InGaAsP и AlGaInAs, согласованные по параметру решетки с подложкой InP, благодаря возможности обеспечения высококачественного роста с низким уровнем дефектов [9]. Проведенные исследования однопереход-

ных ФПЛИ позволили продемонстрировать эффективность преобразования 40–41 % для диапазона длин волн 1060–1070 nm при использовании как структур InGaAsP/InP [10,11], так и структур AlGaInAs/InP [12]. Дальнейший прогресс в КПД ФПЛИ на основе InGaAsP/InP был связан с разработкой их многопереходных конструкций [13,14], при этом совсем недавно был продемонстрирован восьмипереходный ФПЛИ с КПД 55 % [15].

Альтернативой для спектрального диапазона 1020–1070 nm являются гетероструктуры InGaAs/GaAs, сформированные по метаморфной технологии. Даже на основе одного InGaAs *p–n*-перехода были созданы ФПЛИ с КПД, близкими к 55 % для лазерных линий 1064 nm [16,17] и 1020 nm [18]. Однако технология роста метаморфных слоев неизбежно ведет к наличию остаточной концентрации прорастающих дислокаций в активной области прибора, поэтому согласованные по параметру решетки гетероструктуры InGaAsP/InP имеют гораздо лучшую перспективу с точки зрения реализации максимальной эффективности преобразования узкополосного излучения.

В нашей предыдущей работе [19] был создан ФПЛИ на основе слоев In_{0.74}Ga_{0.26}As_{0.5}P_{0.5}, выращенных методом металлоорганической газовой эпитаксии (МОГФЭ), имеющих рассогласование по параметру решетки с подложкой InP $\Delta a/a = -2000$ ppm и ширину запрещенной зоны 1.05 eV (край поглощения 1190 nm). Точный состав четверного твердого раствора определялся комплексом методик, включающих фотолюминесценцию, рентгеновскую дифрактометрию и энергодисперси-

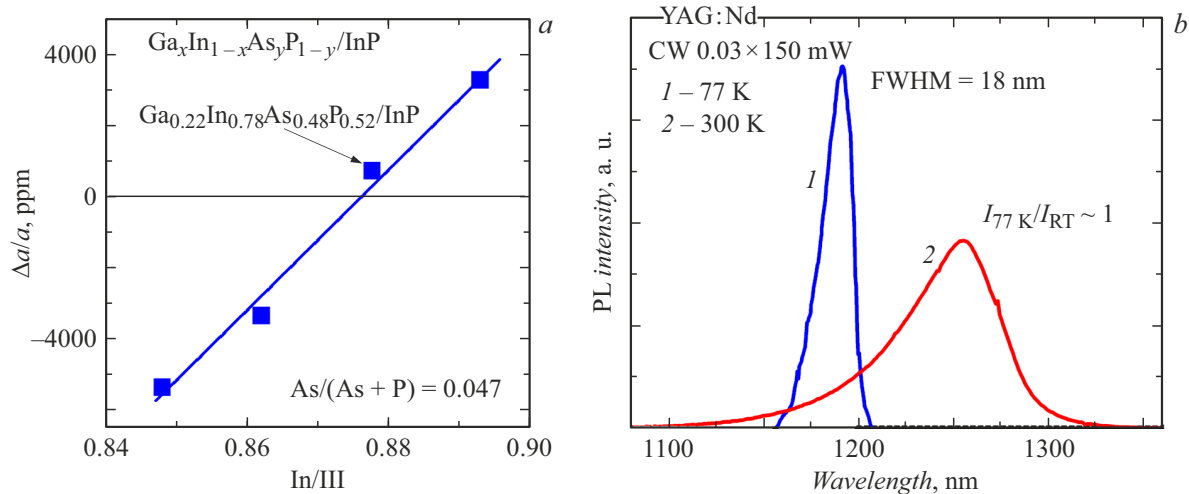


Рис. 1. *a* — зависимость рассогласования параметров решетки выращенных слоев InGaAsP и подложки InP от отношения мольного потока атомов индия к общему мольному потоку атомов третьей группы в газовой фазе; *b* — спектры фотолюминесценции слоя In_{0.78}Ga_{0.22}As_{0.5}P_{0.5} при комнатной температуре и температуре жидкого азота.

онную рентгеновскую спектроскопию. Потенциал КПД такого ФПЛИ для лазерной линии 1064 nm был оценен на уровне 40 %.

В настоящей работе описываются дальнейшие исследования в области создания ФПЛИ на основе InGaAsP/InP для ближнего инфракрасного диапазона.

Для согласования разработанных ранее слоев InGaAsP [19] по параметру решетки с подложкой были проведены эксперименты по осаждению методом МОГФЭ эпитаксиальных слоев In_xGa_{1-x}As_{0.5}P_{0.5} при варьировании отношения мольного потока атомов индия к общему мольному потоку атомов третьей группы в газовой фазе (In/III). При этом отношение мольного потока арсина к общему потоку атомов пятой группы в газовой фазе (As/(As+P)) не менялось и составляло 0.047. Процессы проводились с использованием горизонтального реактора пониженного давления. Триметилгаллий и триметилиндий использовались в качестве источников атомов третьей группы, арсин и фосфин — в качестве источников атомов пятой группы.

Исследования выращенных образцов методом рентгеновской дифрактометрии позволили получить зависимость рассогласования параметров решетки слоев InGaAsP и подложки InP от отношения In/III (рис. 1, *a*), а также определить условия осаждения согласованного по параметру решетки с подложкой слоя In_{0.78}Ga_{0.22}As_{0.5}P_{0.5}. Ширина запрещенной зоны данного слоя, согласно данным фотолюминесценции (рис. 1, *b*), составила 0.98 eV (край поглощения 1260 nm). Важно отметить, что выращенный слой обладал высокой однородностью, о чем свидетельствует малая полуширина пика при температуре жидкого азота 18 nm (16 meV) (линия 1 на рис. 1, *b*), а также высоким кристаллическим совершенством, о чем свидетельствует сохранение интегральной интенсивности пика при охлаждении образца

от комнатной температуры до температуры жидкого азота ($I_{77\text{ K}}/I_{\text{RT}} \sim 1$).

На базе такого четверного твердого раствора методом МОГФЭ на подложке n^+ -InP (100) была выращена гетероструктура ФПЛИ, включающая последовательно осажденные на подложку поглощающий слой из n -In_{0.78}Ga_{0.22}As_{0.5}P_{0.5} толщиной 4000 nm, широкозонный эмиттерный слой из p -InP толщиной 3500 nm и контактный слой p^{++} -In_{0.5}Ga_{0.5}As толщиной 300 nm. В качестве источника атомов донорной примеси использовался моносилан, акцепторной — диэтилцинк.

На основе данной структуры с применением метода фотолитографии были изготовлены чипы ФПЛИ размером 3 × 3 mm с шагом контактных шин 100 μm. Контактные системы Au:Ge/Ni/Au и Ag:Mn/Ni/Au были нанесены на подложку n -InP и контактный слой p^{++} -In_{0.5}Ga_{0.5}As соответственно. Металлические контакты утолщались электрохимическим осаждением золота (2 μm). Лицевая контактная сетка была сформирована путем селективного травления контактного слоя p^{++} -In_{0.5}Ga_{0.5}As с последующим нанесением антиотражающего покрытия TiO₂/SiO₂ непосредственно поверх широкозонного эмиттера p -InP.

Результаты измерения спектральной чувствительности (SR) и отражения (R), а также расчетный спектр предельной спектральной чувствительности приведены на рис. 2. Под предельной спектральной чувствительностью понимается величина, получаемая с помощью формулы

$$SR_{lim}(\lambda) = \frac{SR(\lambda)}{1 - R(\lambda)}. \quad (1)$$

Можно видеть, что изготовленные ФПЛИ имеют высокую спектральную чувствительность в диапазоне 1000–1200 nm (внешняя квантовая эффективность фототовета составляет 85–90 %), а край поглощения хорошо согласуется с данными фотолюминесценции (рис. 1, *b*).

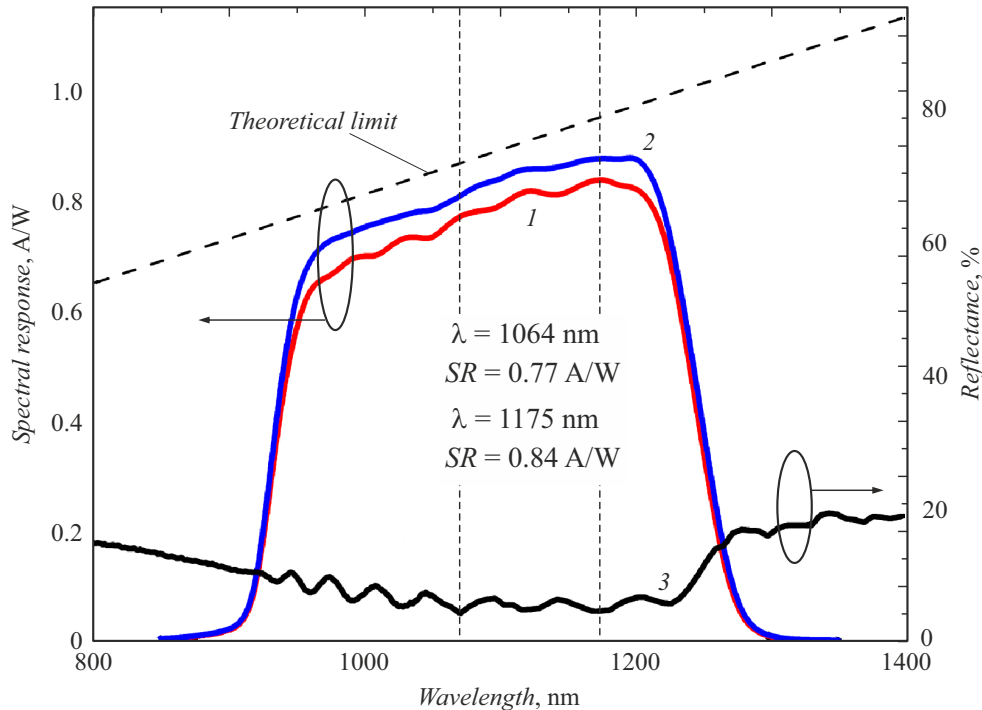


Рис. 2. Зависимости спектральной чувствительности (1), предельной спектральной чувствительности (2) и отражения (3) ФПЛИ на основе InGaAsP от длины волны.

Отражение от поверхности ФПЛИ в этом диапазоне (линия 3 на рис. 2) составляет порядка 4–7 %, что ограничивает КПД ФПЛИ. Максимальная спектральная чувствительность (линия 2 на рис. 2) наблюдается на длине волны 1175 nm ($SR = 0.84 \text{ A/W}$), а для длины волны 1064 nm $SR = 0.77 \text{ A/W}$.

Были проведены серии измерений нагрузочных вольт-амперных характеристик (ВАХ) созданных ФПЛИ при равномерной засветке импульсным имитатором и получен набор нагрузочных ВАХ при разном уровне засветки. Для измерения использовалась ксеноновая импульсная лампа с длительностью импульса 1.5 ms (ВАХ регистрировалась в пределах плато облучения в 1 ms). На основе полученных ВАХ были рассчитаны КПД ФПЛИ для длин волн 1064 и 1175 nm по следующей методике.

Расчет плотности падающей мощности лазерной линии с длиной волны λ ($P_{inc}(\lambda)$), дающей заданную плотность тока короткого замыкания (J_{sc}), проводился по формуле

$$P_{inc}(\lambda) = \frac{J_{sc}}{SR(\lambda)}. \quad (2)$$

При этом КПД ($\eta(\lambda)$) ФПЛИ определялся на основе полученных нагрузочных ВАХ следующим образом:

$$\eta(\lambda) = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF \cdot SR(\lambda)}{J_{sc}} = V_{oc} \cdot FF \cdot SR(\lambda), \quad (3)$$

где V_{oc} — напряжение холостого хода, FF — фактор заполнения ВАХ.

Рассчитанные таким образом параметры разработанных ФПЛИ на основе InGaAsP/InP приведены на рис. 3. Созданные ФПЛИ продемонстрировали эффективность преобразования лазерной линии 1175 nm на уровне 51.4 % при плотности падающей мощности порядка 5 W/cm^2 (линия 4 на рис. 3), а также лазерной линии 1064 nm на уровне 47.2 % при плотности падающей мощности порядка 5.5 W/cm^2 (линия 3 на рис. 3). Насколько известно авторам, для однопереходных ФПЛИ на основе гетероструктуры InGaAsP/InP продемонстрированный результат для длины волны 1064 nm является на данный момент лучшим из опубликованных в открытой печати. Кроме того, разработанные ФПЛИ могут быть применены для передачи энергии с использованием эффективных волоконных лазерных диодов, излучающих на длине волны 1178 nm [20]. Важно отметить, что расчеты КПД по формуле (3) с использованием предельной спектральной чувствительности, полученной по формуле (1), позволяют оценить потенциал разработанной структуры ФПЛИ для длины волны 1175 nm на уровне 53.2 % ($SR_{lim} = 0.87 \text{ A/W}$), а для длины волны 1064 nm — на уровне 49.7 % ($SR_{lim} = 0.81 \text{ A/W}$).

Финансирование работы

Авторы благодарят за финансовую поддержку Министерство науки и высшего образования РФ (тема FFUG-2024-0026). Е.В. Пирогов благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2026-0034) за возможность проведения

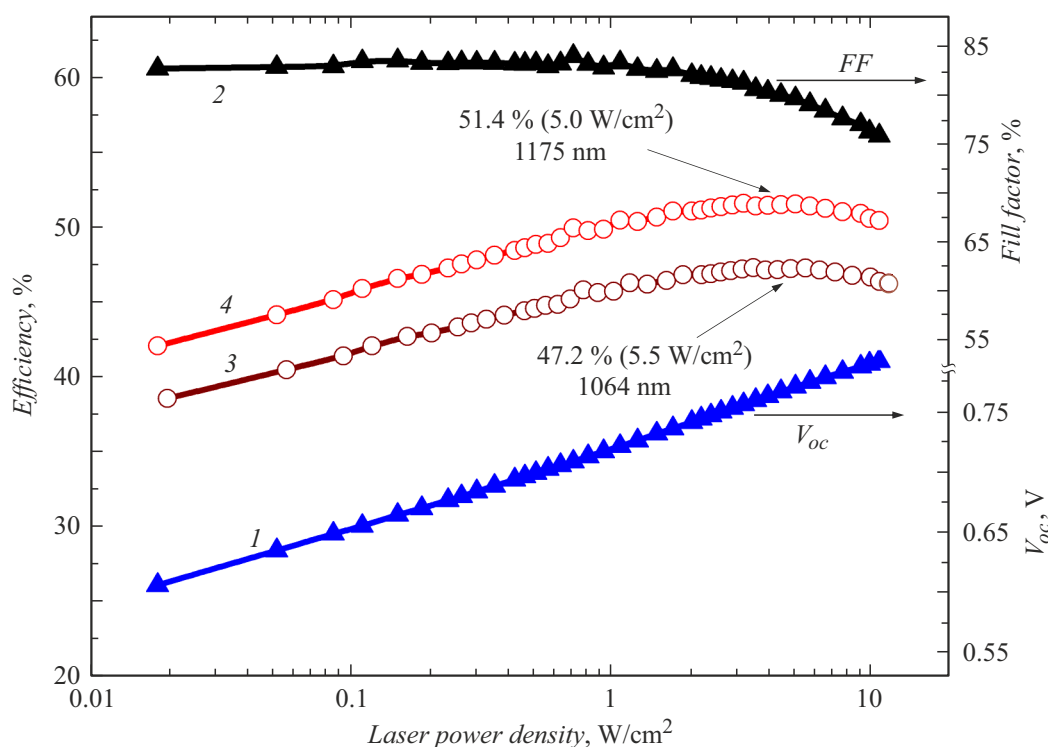


Рис. 3. Зависимости напряжения холостого хода (1), фактора заполнения ВХХ (2), а также КПД ФПЛИ на основе InGaAsP для лазерных линий 1064 (3) и 1175 nm (4) от плотности мощности падающего лазерного излучения.

измерений методом рентгеновской дифрактометрии. А.М. Надточий благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2026-0022) за возможность проведения измерений методом фотолюминесценции.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Zhang, G. Hu, L. Wang, Y. Liu, L. Wei, Y. Zheng, Y. Shao, *Laser Optoelectron. Prog.*, **59** (17), 1736001 (2022). DOI: 10.3788/LOP202259.1736001
- [2] C. Algora, I. García, M. Delgado, R. Peã, *Joule*, **6** (2), 340 (2022). DOI: 10.5281/zenodo.6620474
- [3] P. Jaffe, J. McSpadden, *Proc. IEEE*, **101** (6), 1424 (2013). DOI: 10.1109/JPROC.2013.2252591
- [4] X. Hou, L. Zhou, S. Dong, D. Shi, E. Zhang, G. Chen, H. Zhang, *Space Solar Power Wireless Transmis.*, **2** (2), 73 (2025). DOI: 10.1016/j.sspwt.2025.06.004
- [5] J. Grandidier, P. Jaffe, W.T. Roberts, M.W. Wright, A.A. Fraeman, C.A. Raymond, A. Austin, P. Lubin, E.T. Sunada, J.-P. Jones, A. Barchowsky, J.D. Baker, *Jet Propulsion*, **818**, 354 (2021). DOI: 10.3847/25c2feb.13f46900
- [6] M.-A. Lahmeri, M.A. Kishk, M.-S. Alouini, *IEEE Commun. Mag.*, **60** (5), 50 (2022). DOI: 10.13140/RG.2.2.19370.75202
- [7] S. Liu, W. Xu, R. Tan, F. Ning, Z. Li, *Photonics*, **12** (2), 143 (2025). DOI: 10.3390/photonics12020143
- [8] J. Grandidier, A. Akins, D. Crisp, Y.J. Lee, J. Schwartz, R. Bugga, J.L. Hall, S. Limaye, E.J. Brandon, *Acta Astron.*, **211**, 376 (2023). DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.06.042
- [9] M. Emziane, R.J. Nicholas, *J. Appl. Phys.*, **101** (5), 054503 (2007). DOI: 10.1063/1.2709525
- [10] 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
- [11] W. Willie, K. Nakano, Y.Z. Liu, P.D. Dapkus, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **29** (9), 1449 (1982). DOI: 10.1109/T-ED.1982.20895
- [12] N. Singh, C.K.F. Ho, Y.N. Leong, K.E.K. Lee, H. Wang, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **37** (9), 1154 (2016). DOI: 10.1109/LED.2016.2591015
- [13] J. Yin, Y. Sun, A. Wang, S. Yu, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **43** (8), 1291 (2022). DOI: 10.1109/LED.2022.3183833
- [14] J. Yin, Y. Sun, S. Yu, Y. Zhao, R. Li, J. Dong, *J. Semicond.*, **41** (6), 062303 (2020). DOI: 10.1088/1674-4926/41/6/062303
- [15] S. Fafard, D. Masson, *Photonics*, **12** (5), 406 (2025). DOI: 10.3390/photonics12050406
- [16] C. Pellegrino, H. Helmers, J. Ohlmann, O. Höhn, D. Lackner, in *2023 13th Eur. Space Power Conf. (ESPC)* (IEEE, 2023), p. 1–4. DOI: 10.1109/ESPC59009.2023.10298134
- [17] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Sali, M.Z. Shvarts, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **217**, 110710 (2020). DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110710

- [18] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, S.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, AIP Conf. Proc., **2298**, 030001 (2020). DOI: 10.1063/5.0032903
- [19] К.А. Гаврилов, В.В. Евстропов, Н.А. Калюжный, М.А. Минтаиров, С.А. Минтаиров, А.М. Надточий, М.В. Нахимович, Е.В. Пирогов, Р.А. Салий, М.З. Шварц, ФТП, **59** (8), 447 (2025). DOI: 10.61011/FTP.2025.08.62185.7973 [K.A. Gavrilov, V.V. Evstropov, N.A. Kalyuzhnyy, M.A. Mintairov, S.A. Mintairov, A.M. Nadtochiy, M.V. Nakhimovich, E.V. Pirogov, R.A. Salii, M.Z. Schwartz, Semiconductors, **59** (8), 409 (2025). DOI: 10.61011/SC.2025.08.62597.7973].
- [20] L. Huang, H. Zhang, X. Wang, P. Zhou, IEEE Photon. J., **8** (3), 1501407 (2016). DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2557300