

07.2;07.3;08.3;09.1;13.1;13.4

## Высокоэффективные GaInP/GaAs-фотопреобразователи лазерной линии 600 nm

© С.А. Минтаиров, А.В. Малевская, М.А. Минтаиров, М.В. Нахимович, Р.А. Салий, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 9 декабря 2022 г.  
В окончательной редакции 11 января 2023 г.  
Принято к публикации 11 января 2023 г.

Изготовлены оптимизированные фотопреобразователи на основе гетероструктур GaInP/GaAs, выращенных методом металлоорганической газофазной эпитаксии, для работы с лазерным излучением высокой мощности зелено-красного спектрального диапазона. Для формирования лицевой контактной сетки приборов исследованы контактные системы Au(Ge)/Ni/Au и Pd/Ge/Au. В результате фотопреобразователь лазерной линии с длиной волны 600 nm с Pd/Ge/Au-контактом демонстрировал КПД более 50% вплоть до плотности мощности падающего излучения  $30 \text{ W/cm}^2$  с максимальным значением 54.4% при  $7 \text{ W/cm}^2$ .

**Ключевые слова:** фотопреобразователь, лазерное излучение, металлоорганическая газофазная эпитаксия (МОСГФЭ), КПД, спектральная чувствительность.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.06.54814.19458

Лазерные системы передачи энергии невосприимчивы к электромагнитным помехам и являются перспективными для беспроводного питания удаленных датчиков и беспилотных аппаратов, а также для передачи энергии в космосе. Полупроводниковые фотопреобразователи лазерного излучения (ФПЛИ) являются ключевыми компонентами систем передачи энергии с использованием лазерного луча. Благодаря возможности согласования ширины запрещенной зоны материала ФПЛИ с длиной волны лазерного излучения существенно снижаются тепловые потери, а КПД современных ФПЛИ находятся на уровне 60% и более [1–3]. В последние два десятилетия большинство исследований было посвящено ФПЛИ на основе GaAs с длинноволновым краем поглощения 870 nm [1–6]. Также для целей беспроводной передачи энергии на большие расстояния перспективным спектральным диапазоном являются длины волн порядка  $1 \mu\text{m}$  ввиду как лучшего пропускания атмосферы, так и коммерческой доступности высокоомощных лазеров на основе иттрий-алюминиевого граната с длиной волны основной гармоники 1064 nm [7]. Для этой длины волны были созданы ФПЛИ на основе кремния [8] и полупроводниковых соединений  $A^3B^5$ : InGaAsP [9,10] и InAlGaAs [11], согласованных по параметру решетки с подложкой InP, а также на основе материалов InGaAs, выращиваемых через метаморфный буфер на подложках GaAs [12–14].

ФПЛИ на основе GaInP, согласованного по параметру решетки с подложкой GaAs, представляют интерес в системах передачи энергии под водой для автономных подводных аппаратов [15] с использованием лазеров в диапазоне длин волн 400–700 nm, где коэффициент пропускания света в морской воде высок. Кроме того,

возможность использования второй гармоники лазеров на основе иттрий-алюминиевого граната с длиной волны, находящейся в зеленой области спектра (532 nm), обуславливает перспективность ФПЛИ на основе GaInP для беспроводных систем передачи энергии через атмосферу. В этих приложениях требуется обеспечение не только высокого КПД ФПЛИ, но и возможности преобразования высокой плотности мощности падающего излучения (более  $10 \text{ W/cm}^2$ ).

На данный момент продемонстрированы ФПЛИ на основе GaInP с КПД 39.4% ( $0.1 \text{ W/cm}^2$ ) для длины волны 520 nm и 33.3% ( $0.1 \text{ W/cm}^2$ ) для 633 nm [16], а также 46.7% ( $1.5 \text{ W/cm}^2$ ) для 638 nm [17]. Недавно нами были созданы ФПЛИ с высокими значениями КПД при гораздо большей плотности мощности падающего излучения [18]: 46.7% ( $13 \text{ W/cm}^2$ ), 44.3% ( $14 \text{ W/cm}^2$ ) и 40.6% ( $16 \text{ W/cm}^2$ ) на длинах волн 600, 532 и 633 nm соответственно.

В настоящей работе описывается оптимизация гетероструктуры и конструкции контактной системы ФПЛИ на основе GaInP, обеспечившая достижение значений КПД более 50%.

Исследуемая оптимизированная структура ФПЛИ была выращена методом металлоорганической газофазной эпитаксии на подложке  $p^+$ -GaAs (100). Математическое моделирование [19] ФПЛИ с КПД 46.7% [18] позволило определить диффузионные длины неосновных носителей заряда в фотоактивных слоях GaInP, которые составили 80 nm для дырок в эмиттерном слое и  $1.2 \mu\text{m}$  для электронов в базовом слое, и рассчитать оптимальные толщины этих слоев. Для обеспечения большего поглощения фотонов с длиной волны 600–640 nm толщина базового слоя была увеличена с 600 до 950 nm, а для

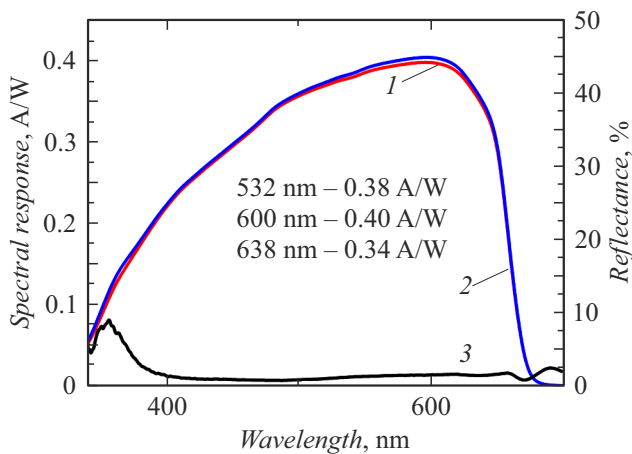


Рис. 1. Спектры внешней (1), внутренней (2) спектральной чувствительности и отражения (3) оптимизированного ФПЛИ на основе GaInP.

улучшения сбора фотогенерированных носителей из глубины базового слоя в него было встроено тянущее электрическое поле за счет создания градиента уровня легирования. Также была проведена подстройка толщины эмиттерного слоя, обеспечивающего растекание тока между контактными шинами, которая была уменьшена со 100 до 75 нм.

Таким образом, выращенная оптимизированная структура имела электрическую полярность  $n/p$  и содержала следующие слои, последовательно осажденные на подложку  $p$ -GaAs: слой тыльного потенциального барьера  $p^+$ -GaInP с увеличенной толщиной 200 нм, базовый слой  $p$ -GaInP с градиентом легирования (от  $1 \cdot 10^{18}$  до  $3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) толщиной 400 нм, базовый слой  $p$ -GaInP с постоянным уровнем легирования ( $3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) толщиной 550 нм, эмиттерный слой  $n$ -GaInP толщиной 75 нм, слой широкозонного окна  $n$ -AlInP толщиной 30 нм, а также контактный слой  $n^+$ -GaAs толщиной 300 нм.

Из выращенной структуры были изготовлены чипы ФПЛИ по двум постростовым технологиям, различающимся типом формируемого металлического лицевого контакта: Au(Ge)/Ni/Au и Pd/Ge/Au. Температурный отжиг контактной системы Pd/Ge/Au проводился при пониженной температуре ( $190^\circ\text{C}$ ) в сравнении с температурой для Au(Ge)/Ni/Au ( $400^\circ\text{C}$ ), что обеспечивает улучшение морфологии контакта и снижение неоднородности распределения контактного сопротивления по площади образца. Подробнее детали технологии изготовления чипов представлены в [18].

Измерения спектральной чувствительности (SR) ФПЛИ были выполнены путем сравнения их фототока с фототоком калиброванного эталонного образца. Для этого использовалась установка на основе монохроматора. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) регистрировались с помощью импульсного имитатора.

Спектральные зависимости SR и отражения для оптимизированного ФПЛИ на основе GaInP с обоими типами лицевых контактов были одинаковы. На рис. 1 представлены зависимости измеренной внешней спектральной чувствительности и полученной с учетом отражения внутренней спектральной чувствительности. За счет нанесения просветляющих покрытий получен достаточно низкий (не более 2%) коэффициент отражения в диапазоне длин волн 500–700 нм. Максимальное значение  $SR = 0.40 \text{ A/W}$  достигается на длине волны 600 нм. Для длины волны 532 нм ФПЛИ демонстрирует увеличенную  $SR = 0.38 \text{ A/W}$ , а на длине волны 638 нм SR составляет  $0.34 \text{ A/W}$ .

Оба чипа оптимизированных ФПЛИ также демонстрировали одинаковое напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ ) и высокий уровень фактора заполнения ВАХ ( $FF$ ) порядка 90% в исследованном диапазоне плотности мощности падающего излучения (рис. 2). При этом оптимизированные образцы ФПЛИ с обоими типами контактов показали прирост  $V_{oc}$  на величину порядка 10 мВ. Например, при мощности падающего излучения  $10 \text{ W/cm}^2$   $V_{oc}$  неоптимизированного образца составлял 1.528 В [18], а оптимизированные ФПЛИ демонстрируют  $V_{oc} = 1.539 \text{ V}$ . Однако для образца, выполненного по технологии с лицевым контактом на основе Au(Ge)/Ni/Au, падение  $FF$  наблюдалось уже при плотностях мощности падающего излучения  $2 \text{ W/cm}^2$ , в то время как ФПЛИ с Pd/Ge/Au-контактом сохранял высокий уровень  $FF$  вплоть до  $6 \text{ W/cm}^2$  (рис. 2).

Таким образом, оптимизация толщин структуры ФПЛИ обеспечила повышение спектральной чувствительности и прирост напряжения холостого хода, а применение контактной системы Pd/Ge/Au обеспечило повышение значений фактора заполнения ВАХ. Это позволило продемонстрировать следующие значения КПД на длине волны 600 нм: 54.4% при плотности мощ-

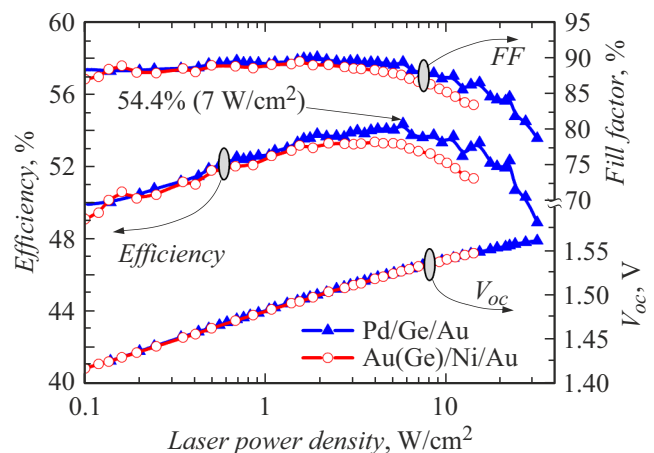


Рис. 2. Зависимости напряжения холостого хода, фактора заполнения ВАХ и КПД от плотности мощности падающего лазерного излучения с длиной волны 600 нм для оптимизированных ФПЛИ на основе GaInP с лицевыми металлическими контактами на основе Pd/Ge/Au и Au(Ge)/Ni/Au.

ности падающего излучения  $7 \text{ W/cm}^2$  для ФПЛИ с контактом Pd/Ge/Au и 53.8% при плотности мощности падающего излучения  $2 \text{ W/cm}^2$  для ФПЛИ с контактом Au(Ge)/Ni/Au. При этом ФПЛИ сохраняют эффективность преобразования более 50% до плотностей мощности падающего излучения 30 и  $20 \text{ A/cm}^2$  соответственно.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00868 А).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, A.W. Bett, *Phys. Status Solidi RRL*, **15** (7), 2100113 (2021). DOI: 10.1002/pssr.202100113
- [2] V. Khvostikov, N. Kalyuzhnyy, S. Mintairov, N. Potapovich, M. Shvarts, S. Sorokina, A. Luque, V. Andreev, *AIP Conf. Proc.*, **1616** (1), 21 (2014). DOI: 10.1063/1.4897019
- [3] S. Fafard, M.C.A. York, F. Proulx, C.E. Valdivia, M.M. Wilkins, R. Arés, V. Aimez, K. Hinzer, D.P. Masson, *Appl. Phys. Lett.*, **108** (7), 071101 (2016). DOI: 10.1063/1.4941240
- [4] S. Fafard, D.P. Masson, *J. Appl. Phys.*, **130** (16), 160901 (2021). DOI: 10.1063/5.0070860
- [5] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, О.А. Хвостикова, Н.Х. Тимошина, *ФТП*, **51** (5), 676 (2017). DOI: 10.21883/FTP.2017.05.44428.8427 [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, O.A. Khvostikova, N.K. Timoshina, *Semiconductors*, **51** (5), 645 (2017). DOI: 10.1134/S1063782617050128].
- [6] E. Lopez, O. Höhn, M. Schauerte, D. Lackner, M. Schachtner, S.K. Reichmuth, H. Helmers, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **29** (4), 461 (2021). DOI: 10.1002/pip.3391
- [7] L. Summerer, O. Purcell, in *Proc. Eur. Space Agency (ESA)–Adv. Concepts Team* (2009). <https://www.esa.int/gsp/ACT/doc/POW/ACT-RPR-NRG-2009-SPS-ICSOS-concepts-for-laser-WPT.pdf>
- [8] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **13** (6), 317 (1992). DOI: 10.1109/55.145070
- [9] 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
- [10] 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
- [11] N. Singh, G.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
- [12] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **217**, 110710 (2020). DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110710
- [13] Y. Kim, H.-B. Shin, W.-H. Lee, S.H. Jung, C.Z. Kim, H. Kim, Y.T. Lee, H.K. Kang, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **200**, 109984 (2019). DOI: 10.1016/j.solmat.2019.109984
- [14] M.Z. Shvarts, V.M. Emelyanov, D.A. Malevskiy, M.A. Mintairov, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, P.V. Pokrovskiy, R.A. Saliy, N.A. Kalyuzhnyy, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **41** (9), 1324 (2020). DOI: 10.1109/LED.2020.3012023
- [15] J. Melo, A. Matos, *Ocean Eng.*, **139**, 250 (2017). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.047
- [16] R. Jomen, F. Tanaka, T. Akiba, M. Ikeda, K. Kiryu, M. Matsushita, H. Maenaka, P. Dai, S. Lu, S. Uchida, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57** (8S3), 08RD12 (2018). DOI: 10.7567/JJAP.57.08RD12
- [17] K. Kurooka, T. Honda, Y. Komazawa, R. Warigaya, S. Uchida, *Appl. Phys. Express*, **15** (6), 062003 (2022). DOI: 10.35848/1882-0786/ac67bb
- [18] С.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, М.А. Минтаиров, М.В. Нахимович, Р.А. Салий, М.З. Шварц, Н.А. Калужный, *Письма в ЖТФ*, **48** (5), 24 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.05.52151.19080 [S.A. Mintairov, V.V. Evstropov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (3), 22 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.03.52876.19080].
- [19] 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].