

07.2;07.3;08.3;09.1;13.1;13.4

Фотопреобразователь лазерного излучения на основе GaInP с КПД 46.7% на длине волны 600 nm

© С.А. Минтаиров, В.В. Евструпов, 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 16 ноября 2021 г.
В окончательной редакции 3 декабря 2021 г.
Принято к публикации 3 декабря 2021 г.

Проведена оптимизация структуры GaInP-фотопреобразователя лазерного излучения, выращенной методом металлоорганической газофазной эпитаксии, а также конструкции его чипа для работы с лазерным излучением высокой мощности зелено-красного диапазона спектра. Показана работоспособность фотопреобразователя при плотности мощности падающего излучения до $40\text{--}50\text{ W/cm}^2$. Наибольшие значения КПД для мощных лазерных линий с длиной волны 532, 600 и 633 nm составили при $13\text{--}16\text{ W/cm}^2$ 44.3, 46.7 и 40.6% соответственно. Продемонстрирована эффективность более 40% при увеличении плотности мощности падающего излучения до $40\text{--}50\text{ W/cm}^2$.

Ключевые слова: фотопреобразователь лазерного излучения, металлоорганическая газофазная эпитаксия, КПД, спектральная чувствительность.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.05.52151.19080

В последнее время все бóльшую актуальность приобретает задача беспроводной передачи энергии при помощи лазерного луча как по воздуху, так и с использованием оптоволоконных трактов. Для эффективной передачи энергии необходимо обеспечить работу фотопреобразователей лазерного излучения (ФПЛИ) при максимально возможной плотности мощности падающего излучения, что делает этот параметр ФПЛИ не менее важным, чем КПД. Значительное число исследований было посвящено разработке высокоэффективных ФПЛИ для длин волн ближнего ИК-диапазона, для которого существуют эффективные источники лазерного излучения, согласованные с минимумами поглощения, как для атмосферы, так и для оптоволоконных линий.

Для спектральной полосы 800–850 nm были разработаны ФПЛИ на базе AlGaAs/GaAs. Максимальная эффективность преобразования оптического излучения в электричество, составляющая 54.9% при 36 W/cm^2 [1] и 60% при 30 W/cm^2 [2], была достигнута на длине волны 810 nm. Использование инвертированной технологии и тыльного зеркала позволило получить ФПЛИ с рекордной эффективностью 68.9% для лазерного излучения с длиной волны 858 nm при плотности мощности падающего излучения 11.4 W/cm^2 [3].

В течение длительного времени структуры на основе кремния использовались для создания ФПЛИ для длины волны 1064 nm, на которых была продемонстрирована эффективность 38.8% (1.3 W/cm^2) [4]. Использование метаморфных структур InGaAs/GaAs позволило преодолеть этот уровень и продемонстрировать КПД в 50% при плотности мощности лазера 6.5 W/cm^2 и 48% при

мощности 13 W/cm^2 [5], а также КПД 55% при преобразовании 4 W/cm^2 для близких длин волн (1020 nm) [6].

На длине волны 1550 nm для ФПЛИ на основе InGaAs/InP [7] и GaSb [8] был продемонстрирован КПД 45% (0.1 W/cm^2).

В то же время ФПЛИ для видимой области спектра не изучались так интенсивно, хотя во многих задачах использование лазеров в видимой области спектра предпочтительнее. Были созданы ФПЛИ на основе твердых растворов GaInP, согласованных по параметру решетки с подложкой GaAs, с эффективностью 39.4% (0.1 W/cm^2) для 520 nm и 33.3% (0.1 W/cm^2) для 633 nm [9], а также 46% (1.1 W/cm^2) для 638 nm [10]. Следует отметить, что такой высокий КПД для ФПЛИ на основе GaInP был достигнут при низкой плотности мощности падающего излучения.

В настоящей работе описывается оптимизация структуры ФПЛИ на основе GaInP, а также его чипа для эффективного преобразования лазерных линий 532, 600 и 633 nm с плотностью мощности падающего излучения до $40\text{--}50\text{ W/cm}^2$.

Исследуемая структура ФПЛИ была выращена методом металлоорганической газофазной эпитаксии. Конструкции структуры и чипа были оптимизированы для обеспечения минимальных резистивных потерь, которые являются наиболее критичными при высоких плотностях фототока, генерируемого при воздействии мощного лазерного излучения. Структура имела электрическую полярность n/p и выращивалась на подложке p^+ -GaAs, что позволяло исключить из нее p/p -интерфейсы между AlGaInP и GaAs, которые имеют тенденцию создавать барьеры для неосновных носителей заряда, увеличивая

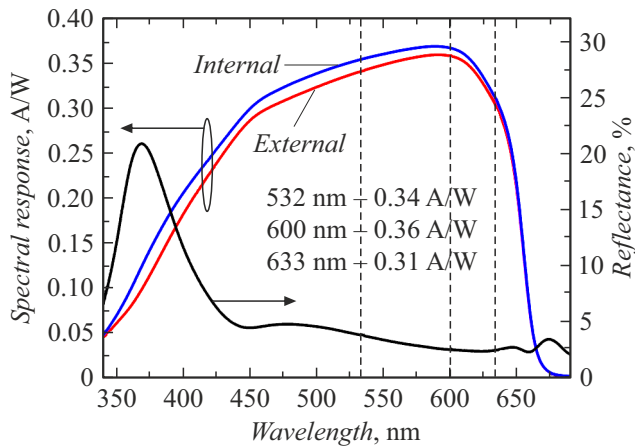


Рис. 1. Спектры внешней и внутренней спектральной чувствительности (верхние линии) и спектр отражения (нижняя линия) ФПЛИ на основе GaInP.

резистивные потери [11]. Она включала слой тыльного потенциального барьера p^+ -GaInP толщиной 100 nm, базовый слой p -GaInP толщиной 600 nm, эмиттерный слой n -GaInP толщиной 100 nm, слой широкозонного окна n -AlInP толщиной 30 nm, а также контактный слой n^+ -GaAs толщиной 300 nm. Структура была оптимизирована для получения максимальной спектральной чувствительности при 600 nm. Для этого общая толщина фотоактивных слоев GaInP составляла 700 nm. Толщина эмиттерного слоя n -GaInP в 100 nm обеспечивала меньшее сопротивление растеканию между контактными шинками. Небольшое количество атомов сурьмы было добавлено во время эпитаксиального роста для уменьшения CuPt-упорядочения в слое GaInP [12], что позволяет увеличить ширину запрещенной зоны (E_g) GaInP и, как следствие, напряжение холостого хода (V_{oc}), генерируемое ФПЛИ.

Контактные системы Au:Ge/Ni/Au и Ag:Mn/Ni/Au были нанесены на контактный слой n -GaAs и подложку p -GaAs соответственно, а затем контакты были утолщены электрохимическим осаждением 2 μm золота. Лицевая контактная сетка была сформирована путем селективного травления контактного слоя GaAs с нанесением антиотражающего покрытия $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ непосредственно поверх широкозонного оконного слоя n -AlInP.

Дизайн лицевой контактной сетки был оптимизирован для уменьшения последовательного сопротивления. Для этого была составлена и численно промоделирована трехмерная распределенная эквивалентная схема. Это позволило уравновесить сопротивление растекания, связанное с токами между шинками контактной сетки, и сопротивление золотых штинок толщиной 2 μm . Найденная оптимизированная конструкция контактной сетки включала шинки шириной 4 μm , равномерно распределенные по фотоактивной поверхности размером 3 \times 3 mm с шагом 100 μm .

Для проведения измерений тестируемый ФПЛИ был припаян на теплоотводящую пластину для предотвращения перегрева под мощным лазерным излучением. Измерения спектральной чувствительности (SR) были выполнены путем сравнения его фототока с калиброванным эталонным образцом. Для этого использовалась установка на основе монохроматора. Вольт-амперные характеристики (V_{oc}) регистрировались с помощью импульсного имитатора.

На рис. 1 представлены спектры SR и спектр отражения ФПЛИ на основе GaInP. Максимальное значение 0.36 A/W, соответствующее внешней квантовой эффективности 75%, достигается на длине волны 600 nm. Для длины волны 532 nm ФПЛИ демонстрирует $SR = 0.34$ A/W. На длинах волн более 600 nm ФПЛИ демонстрирует падение SR из-за его оптимизации на длину волны 600 nm, поэтому на длине волны 633 nm SR составляет всего 0.31 A/W. Следует отметить, что увеличение общей толщины фотоактивных слоев GaInP приведет к увеличению SR на длинах волн более 600 nm.

Отражение в диапазоне длин волн 500–600 nm составляет 2–5% (рис.1), что обусловлено не полностью оптимизированным антиотражающим покрытием и приводит к дополнительным потерям в SR . Спектр „внутренней“ SR (соответствующий внутренней квантовой эффективности) демонстрирует достижимые значения 0.35, 0.37 и 0.32 A/W для лазерных линий 532, 600 и 633 nm.

Оптимизированная конструкция лицевой контактной сетки позволила обеспечить уровень фактора заполнения выше 80% для световых ВАХ при плотности фототока до $J_{sc} = 10$ A/cm² (кривая 2 на рис. 2). Увеличение E_g GaInP из-за включения атомов Sb привело к более высокому генерируемому напряжению. Для сравнения в [10] V_{oc} составляло ~ 1.47 V при плотности мощности падающего излучения 10 W/cm² на длине волны 633 nm, в то время как разработанный ФПЛИ демонстрирует 1.53 V при сопоставимом лазерном облучении (что соответствует $J_{sc} \sim 3$ A/cm²).

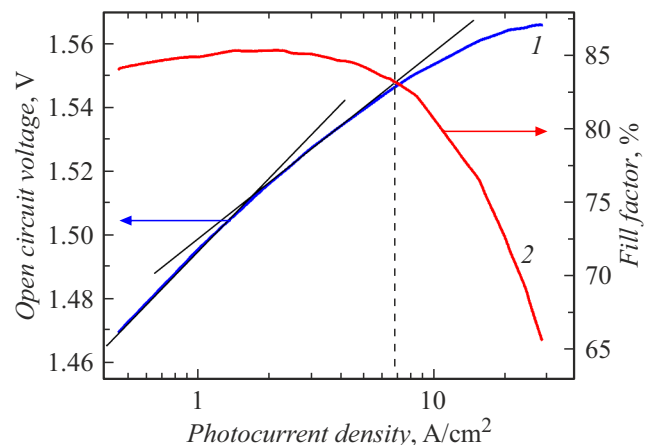


Рис. 2. Зависимости напряжения холостого хода (V) и фактора заполнения ВАХ (2) от плотности фототока, извлеченные из световых ВАХ ФПЛИ на основе GaInP.

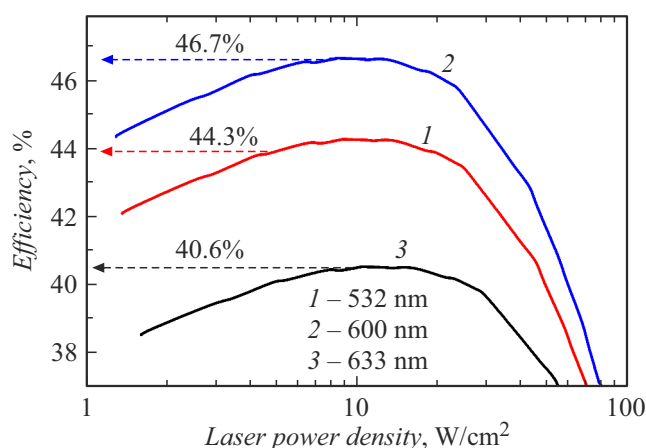


Рис. 3. Эффективность ФПЛИ на длинах волн 532 (1), 600 (2) и 633 нм (3) в зависимости от плотности мощности падающего излучения.

Зависимость V_{oc} от J_{sc} имеет три области (кривая 1 на рис. 2). Эта зависимость, как известно, совпадает с безрезистивной темновой ВАХ [13]. Области при плотностях тока $< 1.7 \text{ A/cm}^2$ и в диапазоне $1.7\text{--}6.5 \text{ A/cm}^2$ хорошо описываются линейными зависимостями и соответствуют механизму протекания тока Шокли–Холла–Рида и механизму Шокли соответственно. „Изгиб“ зависимости $V_{oc}(J_{sc})$ при плотностях тока $> 6.5 \text{ A/cm}^2$ объясняется перегревом образца при высокой мощности падающего излучения [13].

Максимальный КПД, продемонстрированный ФПЛИ, составил 46.7% (13 W/cm^2), 44.3% (14 W/cm^2) и 40.6% (16 W/cm^2) на длинах волн 600, 532 и 633 нм соответственно (рис. 3). При этом ФПЛИ демонстрирует эффективность более 40% до плотности мощности падающего излучения 60 W/cm^2 на длине волны 600 нм, 50 W/cm^2 на длине волны 532 нм и 25 W/cm^2 на длине волны 633 нм.

Насколько известно авторам, значения эффективности преобразования, достигнутые на длинах волн 600 и 532 нм, являются на данный момент наивысшими среди опубликованных результатов. Следует также отметить, что дальнейшая оптимизация структуры ФПЛИ на основе GaInP и антиотражающего покрытия позволит получить КПД более 50% в спектральном диапазоне 500–650 нм.

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] E. Oliva, F. Dimroth, A.W. Bett, Prog. Photovolt.: Res. Appl., **16**, 289 (2008). DOI: 10.1002/pip.811
- [2] V.P. Khvostikov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, N.S. Potapovich, M.Z. Shvarts, S.V. Sorokina, A. Luque, V.M. Andreev, AIP Conf. Proc., **1616**, 21 (2014). DOI: 10.1063/1.4897019
- [3] H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, A.W. Bett, Phys. Status Solidi (RRL), **15**, 2100113 (2021). DOI: 10.1002/pssr.202100113
- [4] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham, IEEE Electron Dev. Lett., **13**, 317 (1992). DOI: 10.1109/55.145070
- [5] 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
- [6] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, S.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, AIP Conf. Proc., **2298**, 030001 (2020). DOI: 10.1063/5.0032903
- [7] J. Mukherjee, S. Jarvis, M. Perren, S.J. Sweeney, J. Phys. D, **46**, 264006 (2013). DOI: 10.1088/0022-3727/46/26/264006
- [8] V. Andreev, V. Khvostikov, V. Kalinovskiy, V. Lantratov, V. Grilikhes, V. Romyantsev, M. Shvarts, V. Fokanov, A. Pavlov, in Proc. of 3rd World Conf. on photovoltaic energy conversion (IEEE, 2003), vol. 1, p. 761. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1305394>
- [9] 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**, 08RD12 (2018). DOI: 10.7567/jjap.57.08rd12
- [10] Y. Komuro, S. Honda, K. Kurooka, R. Warigaya, F. Tanaka, S. Uchida, Appl. Phys. Express, **14**, 052002 (2021). DOI: 10.35848/1882-0786/abf31c
- [11] A.S. Gudovskikh, N.A. Kaluzhniy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, Thin Solid Films, **516**, 6739 (2008). DOI: 10.1016/j.tsf.2007.12.016
- [12] A. Gomyo, T. Suzuki, S. Kawata, I. Hino, T. Yuasa, Appl. Phys. Lett., **50**, 673 (1987). DOI: 10.1063/1.98062
- [13] M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, J. Phys.: Conf. Ser., **1135**, 012070 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1135/1/012070