

Фотоэлектрический приемник лазерного излучения ($\lambda = 809$ нм) на основе GaAs

© В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, О.А. Хвостикова, Н.Х. Тимошина

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

(Получена 13 октября 2016 г. Принята к печати 18 октября 2016 г.)

На основе однопереходных гетероструктур AlGaAs/GaAs, полученных методом эпитаксии из жидкой фазы, созданы преобразователи лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 809$ нм. Разработаны и протестированы фотоэлектрические модули с рабочим напряжением 4 В для преобразования излучения различной плотности. Исследованы два подхода — без использования оптических концентрирующих систем и с применением линз Френеля. В фотоэлектрическом приемнике на основе 64 преобразователей лазерного излучения площадью 0.04 см^2 и концентрирующей системы из матрицы кварцевых линз достигнут монохроматический КПД преобразования $> 44\%$.

DOI: 10.21883/FTR.2017.05.44428.8427

1. Введение

Возможности фотоэлектрического метода получения электричества не ограничиваются использованием только солнечного излучения. С помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе полупроводниковых гетероструктур может быть эффективно преобразовано в электроэнергию и лазерное излучение (ЛИ), спрос на применение которого в последние годы растет как в космической [1–4] и наземной энергетике, так и в военно-гражданских [4,5], бытовых [6] и медицинских сферах. Дистанционная передача энергии по лазерному лучу востребована для энергопитания в космическом пространстве или подзарядки беспилотных летательных аппаратов наземной авиации, при создании космических солнечных электростанций или энергоснабжении арктических, островных и океанических исследовательских станций, а также в труднодоступных районах, где прокладка линий электропередач нерентабельна. ФЭП ЛИ находят применение в портативных медицинских приборах, а также для беспроводной зарядки мобильных телефонов, ноутбуков и других электронных устройств. Сегодня уже можно утверждать, что на уровне расстояний до 10 м такие бытовые устройства стали реальностью [7,8].

Решение сложных практических задач возможно лишь при условии высокой мощности и эффективности подводимого ЛИ, обеспечении достаточно высокого КПД фотоэлектрического преобразования и согласования по рабочей длине волны источника и приемника. В настоящий момент для диапазона длин волн $\lambda = 800–1100$ нм уже существуют инфракрасные лазерные диоды с КПД (η) $> 70\%$ [9]. В качестве приемника ЛИ целесообразно использовать ФЭП на основе арсенида галлия — оптимального материала, преобразующего излучение с $\lambda \approx 800–870$ нм. Технология его изготовления для инфракрасного использования может быть перенесена

непосредственно из технологии традиционных концентраторных солнечных элементов, эффективность которых близка к предельно достижимым значениям. Так, из литературы известно о реализованных на практике разными исследовательскими группами ФЭП ЛИ с $\eta \approx 49.8\%$ ($\lambda = 814$ нм) [7], 52.1% (100 мВт/см^2 , $\lambda = 806$ нм) [8], 53.2% (5 Вт/см^2 , $\lambda = 808$ нм) [10], 54.9% ($\lambda = 810$ нм) [11], 55.1% (8.5 Вт/см^2 , $\lambda = 810$ нм) [12], 56% ($\lambda = 820$ нм) [13].

Цель данной работы заключалась в получении методом эпитаксии из жидкой фазы однопереходных ФЭП ЛИ на основе AlGaAs/GaAs ($\lambda = 809$ нм) и разработке на их основе высокоэффективных модулей с рабочим напряжением 4 В. Сведения о преобразователях, полученных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе методом химического осаждения из паров металлоорганических соединений, содержатся в [14].

2. Технологические особенности и характеристики фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения

Структура ФЭП на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}$ для преобразования ЛИ с $\lambda = 809$ нм состояла из базового слоя $n\text{-GaAs}$, эмиттера $p\text{-GaAs}$ и широкозонного оптического „окна“ с $x = 0.85$. Спектры fotocувствительности ФЭП ЛИ разного размера приведены на рис. 1. Для преобразователей малой площади ($S = 4–16 \text{ мм}^2$) дополнительно осаждался контактный слой $p\text{-GaAs}$ (рис. 1, кривая 2). Под излучением Хе-лампы изготовленные ФЭП ЛИ имели монохроматическую эффективность $\eta \approx 50–56.2\%$ (рис. 2).

Вольт-амперные характеристики ФЭП ЛИ измерялись как под импульсным имитатором, так и под полупроводниковым лазером с длиной волны $\lambda = 809$ нм. Выходные

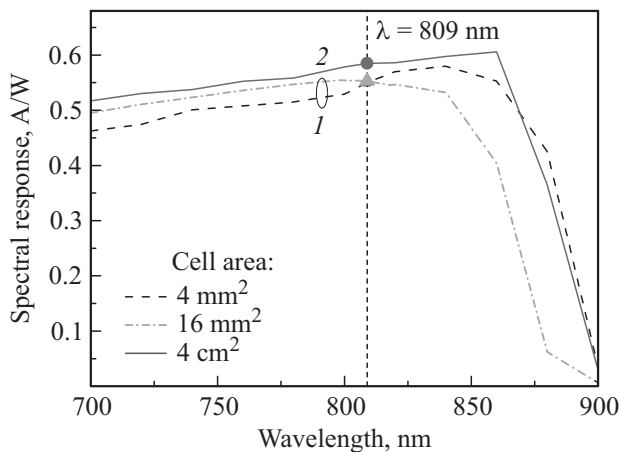


Рис. 1. Спектральная чувствительность ФЭП ЛИ разной площади при наличии (1) и отсутствии (2) контактного слоя.

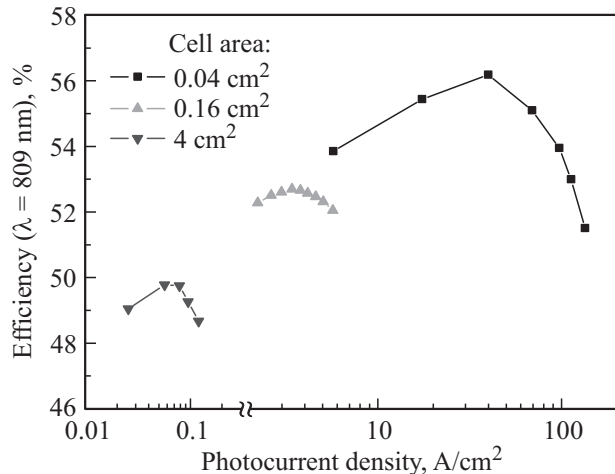


Рис. 2. Зависимость монохроматической эффективности преобразователей (η) от плотности фототока.

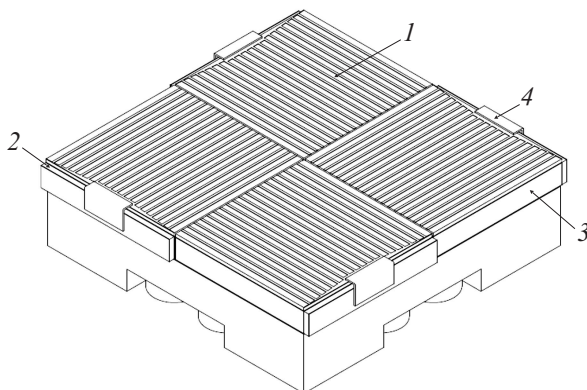


Рис. 3. Модуль для преобразования излучения низкой плотности: 1 — ФЭП, 2 — металлическая плата с диэлектрическим покрытием, 3 — база (медь), 4 — контакт.

Таблица 1. Параметры фотоэлемента ($S = 16 \text{ мм}^2$), измеренные под засветкой полупроводниковым лазером с $\lambda = 809 \text{ нм}$

Мощность лазера, Вт	0.14	0.34	0.70	1.57	3.02
I_{sc} , А	0.09	0.21	0.40	0.95	1.63
V_{oc} , В	1.11	1.14	1.15	1.17	1.176
I_m , А	0.09	0.20	0.36	0.71	1.09
V_m , В	0.97	0.97	0.93	0.88	0.81
P_m , Вт	0.08	0.19	0.34	0.62	0.88
FF , %	86.58	79.96	73.59	56.06	46.19
η , %	58.7	57.08	46.19	39.57	29.23

параметры элемента площадью $S = 16 \text{ мм}^2$, измеренные при различной мощности лазера (от 0.142 до 3.02 Вт), приведены в табл. 1, где I_{sc} — ток короткого замыкания, V_{oc} — напряжение холостого хода, FF — фактор заполнения вольт-амперной характеристики, I_m , V_m , P_m — ток, напряжение и мощность в точке оптимальной нагрузки соответственно.

3. Модули фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения

Изготовленные фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения использовались для создания модулей различного назначения и конструкций. При их разработке возможны два подхода — преобразование лазерного излучения низкой плотности и его концентрирование оптическими системами в 100–1000 раз. При концентрировании ЛИ в модуле повышаются оптические потери и требования к охлаждающим системам. Кроме того, для изготовления линз и зеркал должны использоваться материалы с низкими деградационными характеристиками. С другой стороны, в модулях такого типа имеется возможность значительно уменьшить размер фотоэлемента, что значительно снижает их стоимость и упрощает технологию изготовления ФЭП.

Модуль для преобразования излучения низкой плотности (рис. 3) был собран на основе фотоэлементов с $S = 4 \text{ см}^2$. Каждый из четырех ФЭП ЛИ (1) электрически изолирован от других и от базы (3) при помощи металлической платы с диэлектрическим покрытием (2). Контакты вынесены на торец, что дает возможность объединять в единую систему несколько модулей с минимальным расстоянием между ними. Зазор между питаемыми элементами не превышал 0.1–0.2 мм, что позволяло максимально эффективно использовать для засветки рабочую поверхность. В качестве материала основания модуля была выбрана медь, обладающая высокой теплопроводностью и обеспечивающая эффективный теплоотвод. Применялось воздушное охлаждение. Для повышения его эффективности дополнительно устанавливались радиатор и вентилятор (не показаны на рис. 3). Радиатор и вентилятор жестко не привязаны к модулю

Таблица 2. Параметры смонтированных сборок и линеек

№ сборки	Сборки из 4 элементов				Линейки из 16 элементов
	I_{sc} , А	V_{oc} , В	FF , %	η , %	η , %
1-1	2.02	1.15	86.3	46.7	44.8
1-2	2.05	1.14	86.2	46.2	
1-3	2.05	1.14	85.9	46.0	
1-4	2.18	1.15	86.4	46.6	
2-1	2.03	1.13	84.6	45.0	44.0
2-2	2.09	1.16	85.5	46.6	
2-3	2.06	1.16	82.2	44.7	
2-4	2.11	1.16	86.1	46.8	
3-1	2.08	1.14	84.8	45.3	44.2
3-2	2.04	1.16	83.7	45.5	
3-3	2.10	1.16	85.8	46.6	
3-4	2.08	1.15	86.0	46.6	
4-1	2.23	1.14	83.8	44.7	43.4
4-2	2.01	1.13	84.3	44.9	
4-3	2.20	1.13	84.7	45.1	
4-4	2.06	1.16	82.0	44.7	

и могут выбираться в зависимости от условий его эксплуатации.

Оценка КПД модуля в зависимости от мощности лазерного излучения осуществлялась в следующей последовательности:

— измерение спектральной зависимости внешней квантовой эффективности ФЭП ЛИ с последующим пересчетом полученных значений в единицы спектральной чувствительности (SR) А/Вт;

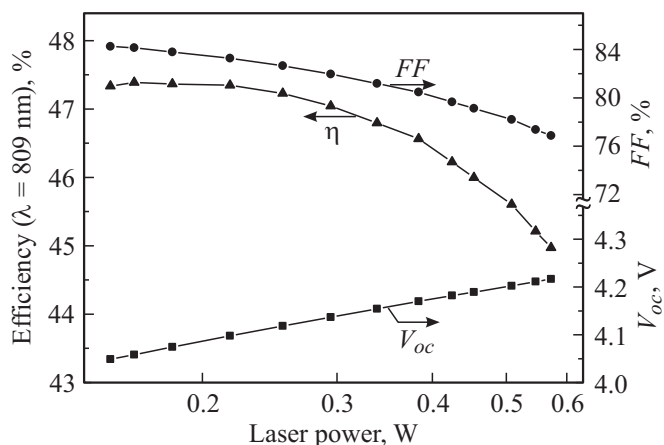
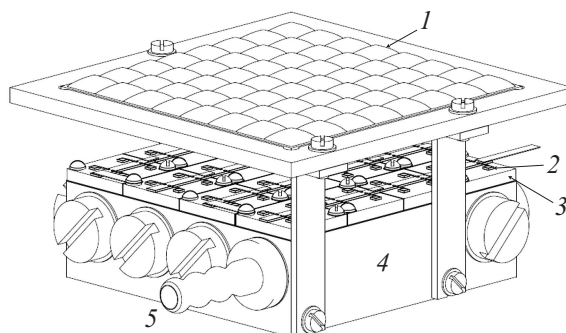
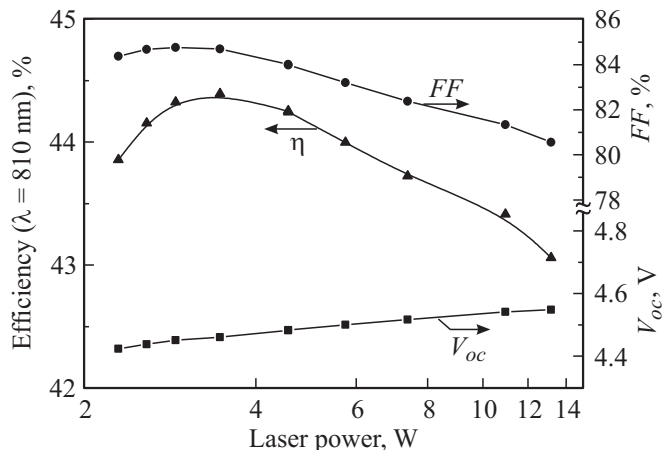
— запись семейства вольт-амперных характеристик модуля на импульсном имитаторе в зависимости от уровня освещенности.

Изменение эффективности модуля при равномерном распределении освещенности на фотоприемной поверхности иллюстрирует рис. 4. При мощности ЛИ 0.16 Вт достигнут КПД $\eta = 47.4\%$. Мощность лазерного излучения рассчитывалась из соотношения I_{sc}/SR .

Модуль с концентрирующей системой (рис. 5) собирался из 64 преобразователей (2) площадью 0.04 см^2 и матрицы (1) из 64 плосковыпуклых кварцевых линз. Размер каждой линзы составлял 10 мм с точностью до $\pm 0.015 \text{ мм}$ при фокусном расстоянии 20 мм. Линзы наклеивались в 8 рядов на кварцевую подложку, образуя квадрат $80 \times 80 \text{ мм}$. Размер фокального пятна в линзе составил 1.2 мм, что позволило точно ($\pm 0.05 \text{ мм}$) сфокусировать излучение лазера на преобразователь.

Четыре параллельно соединенных ФЭП ЛИ монтировались на теплосбрасывающие медные основания (3), которые затем собирались в 4 параллельно соединенных линейки с напряжением 1 В. На завершающем этапе монтажа они соединялись последовательно в модуль с напряжением 4 В (см. табл. 2).

Из-за высокой концентрации падающего на элементы излучения потребовалось эффективное водяное охлаждение, поэтому медные основания с питающими ФЭП ЛИ плотно навинчивались на корпус (4) с проточной водой и подводящей трубкой (5). Симметричный вывод для оттока воды на рис. 5 не показан.

**Рис. 4.** Параметры модуля для преобразования излучения низкой плотности.**Рис. 5.** Концентраторный модуль из 64 ФЭП ЛИ: 1 — матрица из 64 линз, 2 — ФЭП, 3 — база (медь), 4 — корпус для водяного охлаждения, 5 — подача воды.**Рис. 6.** V_{oc} , FF и КПД в зависимости от фототока для концентраторного модуля из 64 элементов.

Особенностью модуля данного типа является высокая сложность сборки в связи с необходимостью точного совмещения фокального пятна линз с фотоактивной поверхностью (диаметр 1.6 мм) большого количества элементов. На этапе проверки основных принципов конструирования и отработки монтажа использовались только тестовые преобразователи с $\eta \approx 44\text{--}47\%$. Эффективность полноразмерного концентраторного модуля при равномерном распределении освещенности показана на рис. 6.

4. Обсуждение результатов

Модуль для преобразования лазерного излучения низкой плотности характеризуется малыми потерями на коммутацию, что позволяет собирать несколько единиц в общую систему с любой требуемой рабочей площадью фоточувствительной поверхности. Его недостаток связан с существенным падением КПД даже при незначительном увеличении мощности лазера, что связано с неоптимальной конфигурацией контактной сетки используемых фотоэлементов. Дальнейшее повышение эффективности данной конструкции будет связано с увеличением КПД отдельных ФЭП ЛИ за счет усовершенствования технологии их изготовления, оптимизации контактной системы (увеличение ширины контактных полосок и замены периферийной шины на центральный токосборный контакт).

Для модуля с концентрирующей системой максимальная эффективность преобразования ЛИ составила 44.5% при мощности лазерного излучения 3.5 Вт. Увеличение мощности более 4.5 Вт приводит к росту потерь на последовательном сопротивлении, снижению FF и, следовательно, падению КПД. Разработанный модуль требует доработки конструкции в отношении способа коммутации ФЭП ЛИ. Так, например, за счет замены параллельно-последовательной схемы соединения фотоэлементов на последовательно-параллельную возможно снижение омических потерь. Замена меди в качестве материала базы на платы с алюминиевой разводкой облегчит пайку образцов и снизит вес модуля. На заключительном этапе разработки в единую систему будет собрано 64 элемента с $\eta \approx 50\text{--}55\%$. Для удобства монтажа преобразователей и упрощения согласования линзы с фотоэлементами планируется также увеличить площадь ФЭП ЛИ до 6.25 мм^2 .

5. Заключение

Исследованы подходы к созданию фотозлектрических модулей для преобразования лазерного излучения высокой и низкой плотности. С использованием однопереходных фотоэлементов на основе AlGaAs/GaAs разработаны и собраны модули указанных типов, проведено их тестирование, и определены основные пути оптимизации каждой из конструкций.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-29-00178).

Список литературы

- [1] В.М. Мельников. Автономная энергетика, **32**, 3 (2014).
- [2] И. Соболев. Троицкий вариант, **169**, 10 (2014).
- [3] V. Bogushevskaya, B. Zhalnin, O. Zayats, Ya. Maslyakov, I. Matsak, A. Nikonov, Ye. Obrucheveva, V. Tugaenko. Thermal Engineering, **59** (13), 975 (2012).
- [4] А. Сигов, В. Матюхин. Современ. электроника, **1**, 18 (2015).
- [5] T.P. Prem Anand, R. Pandiarajan, P. Raju. Intern. J. Mech. Engin. Res., **5** (1), 137 (2015).
- [6] Yu. Liu, Zh. Qin, Ch. Zhao. *AutoCharge: Automatically Charge Smartphones Using a Light Beam*. <https://www.microsoft.com>
- [7] A. Fave, A. Kaminski, M. Lemity, A. Laugier. *Proc. 14th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Barcelona, Spain, 1997) v. 2, p. 1752.
- [8] L.C. Olsen, D.A. Huber, G. Dunham, F.W. Addis. *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialist Conf.* (IEEE, N.Y., 1991) p. 419.
- [9] N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. Electron. Lett., **40** (22), 1413 (2004).
- [10] T. Shan, X. Qi. Infr. Phys. Technol., **71**, 144 (2015).
- [11] E. Oliva, F. Dimroth, A.W. Bett. Prog. Photovolt.: Res. Appl., **16**, 289 (2008).
- [12] J. Schubert, E. Oliva, F. Dimroth, R. Loeckenhoff, A.W. Bett. IEEE Trans. Electron Dev., **56** (2), 170 (2009).
- [13] V. Andreev, V. Khvostikov, V. Kalinovskiy, V. Lantratov, V. Grilikhes, V. Romyantsev, M. Shvarts, V. Fokanov, A. Pavlov. *Proc. 3rd World Conf. Photovoltaic Energy Conversion* (Japan, Osaka, 2003) p. 761.
- [14] В.П. Хвостиков, Н.А. Калужный, С.А. Минтаиров, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, В.М. Емельянов, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев. ФТП, **50** (9), 1242 (2016).

Редактор Л.В. Шаронова

Laser ($\lambda = 809 \text{ nm}$) power converter based on GaAs

V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, O.A. Khvostikova, N.Kh. Timoshina

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Laser power converters with a wavelength of 809 nm have been produced on the basis of AlGaAs/GaAs single junction heterostructures grown by LPE (liquide-phase epitaxy). Photovoltaic modules with the operation voltage of 4 V have been designed and tested for converting radiation of various densities. We have examined two different approaches, namely without an optical concentrating system and with a Fresnel lens. The monochromatic efficiency of more than 44% have been achieved with the photovoltaic module which is based on 64 laser-radiation converters of 0.04 cm^2 in area and concentrating system made of quartz lens matrix.