

Модуль фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения ($\lambda = 1064$ нм)

© В.П. Хвостиков, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.С. Потапович, С.В. Сорокина, М.З. Шварц

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 27 марта 2019 г.
В окончательной редакции 4 апреля 2019 г.
Принята к публикации 4 апреля 2019 г.

Представлены результаты разработки и исследования модуля, предназначенного для приема и преобразования лазерного излучения в системах дистанционной передачи энергии на атмосферных трассах. Четырехэлементный модуль на основе однопереходных метаморфных фотоэлектрических преобразователей InGaAs/GaAs, полученных газовой эпитаксией из металлоорганических соединений, имеет напряжение холостого хода ~ 3 В. При преобразовании световой мощности 1.5 Вт/см² монохроматический КПД модуля на длине волны $\lambda = 1064$ нм составляет 31.5%.

Ключевые слова: лазерное излучение, фотоэлектрический преобразователь, модуль, InGaAs/GaAs, беспроводная передача энергии, гетероструктура.

DOI: 10.21883/FTP.2019.08.48007.9118

1. Введение

Для систем беспроводной передачи энергии по лазерному каналу требуются эффективные и надежные приемники-преобразователи световой мощности в электрическую. Для эффективной (без потерь) передачи энергии наиболее удобным представляется инфракрасный диапазон длин волн вблизи $\lambda \approx 1064$ нм, попадающий в область окна прозрачности атмосферы, а также оптоволокна. Волоконные лазеры с такими λ характеризуются не только хорошим качеством луча, достаточно высоким КПД (20–25%) и стабильностью выходной мощности, но также низкой стоимостью и малыми габаритами [1].

Сегодня отечественные предприятия предлагают лазерные источники с длиной волны излучения $\lambda \approx 1064$ нм в широком диапазоне мощностей — $P = 5–30000$ Вт [2,3]. Создание систем беспроводной передачи энергии сдерживает то обстоятельство, что длина волны 1064 нм является технологически неудобной для получения эффективных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). В научной литературе достаточно мало сведений об их успешной практической реализации. В частности, в [4] сообщается о получении фотоприемника на основе кремния площадью $S = 4$ см² с КПД 39.4% при 58.4 мВт/см². Кремниевые ФЭП эффективно работают лишь при низкой плотности излучения, и с ее нарастанием КПД преобразователя значительно снижается. Для мощного лазерного излучения (ЛИ) преимущество имеют преобразователи на основе гетероструктур InGaAs/GaAs [5–8] или GaInAsP/InP [9,10].

Моделирование характеристик ФЭП лазерного излучения [5] показывает, что как при равномерном, так и при гауссовом распределении освещенности, и при мощностях ЛИ $P \approx 2–10$ Вт в GaInAsP/InP-преобразо-

вателях достижима монохроматическая ($\lambda = 1064$ нм) эффективность $\sim (50–55)\%$. Однако практическое получение высококачественных гетероструктур GaInAsP/InP необходимых составов осложняется близостью к области спинодального распада твердого раствора [11].

Одновременное достижение высокой спектральной чувствительности в диапазоне длин волн > 1 мкм и напряжения холостого хода > 0.7 В возможно в ФЭП на основе InGaAs/GaAs с содержанием индия в фотоактивных слоях $> 20\%$. Так, для преобразователей с $p-n$ -переходом в In_{0.24}Al_{0.76}As теоретические оценки дают эффективность $\eta > 60\%$ при мощностях подводимого ЛИ до 5 Вт [5]. Полученные на практике максимальные значения КПД для такого типа ФЭП составляют $\sim 45\%$ при равномерной облученности поверхности ФЭП с плотностью ЛИ ~ 7.5 Вт/см². В режиме неравномерно распределенной освещенности от лазерного источника эффективность ФЭП превышает 44% при плотностях ЛИ до 4 Вт/см² [6].

В настоящей работе представлен вариант практической реализации многоэлементного модуля на основе InGaAs/GaAs-ФЭП для систем дистанционной передачи и фотоэлектрического преобразования лазерного излучения с длиной волны $\lambda \approx 1064$ нм.

2. Преобразователи лазерного излучения для многоэлементного фотоэлектрического модуля

Фотоэлектрический модуль (ФЭМ) формировался из InGaAs/GaAs-ФЭП ЛИ размером 10×10 мм. Гетероструктуры для ФЭП разрабатывались и изготавливались в ФТИ им. А.Ф. Иоффе методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на установке

AIXTRON 200/4 [8]. Гетероструктуры включали широкозонное оптическое окно $p\text{-In}_y(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{1-y}\text{As}$, фотоактивную область $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ с $p\text{-}n$ -переходом, тыльный потенциальный барьер $n\text{-In}_y(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{1-y}\text{As}$ и контактный слой $p^+\text{-In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Для релаксации упругих напряжений осаждались метаморфные буферные слои на основе твердых растворов InGaAs с переменным содержанием In с шагом $\sim 3.5\%$. На фронтальную поверхность наносилось просветляющее покрытие $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ с минимумом отражения для заданной длины волны.

3. Влияние нагрева на параметры фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения

Для прогнозирования изменения эффективности многоэлементного модуля, а также определения необходимости установки активных систем охлаждения, были проведены испытания по влиянию нагрева и мощности засветки лазерным излучением на параметры преобразователей. В целях удобства эксперимента использовались относительно малые образцы с общей площадью $S = 0.1 \text{ см}^2$ (при фоточувствительной поверхности 7.8 мм^2). ФЭП ЛИ облучались лазером с $\lambda = 1064 \text{ нм}$ в непрерывном режиме генерации (рис. 1). Тестирование при температуре $T < 25^\circ\text{C}$ проводилось с использованием криостата. Параметры ФЭП в диапазоне $T = (-50)\text{--}130^\circ\text{C}$ при мощностях засветки $P = 0.15, 0.3$ и 0.5 Вт приведены на рис. 2. Снижение температуры до $T = -50^\circ\text{C}$ способствует повышению кпд ФЭП на $\sim 5\%$, прежде всего за счет роста напряжения холостого хода (V_{oc}), определяющегося увеличением ширины запрещенной зоны полупроводникового материала. Дальнейшее понижение температуры ФЭП в рамках данного исследования не представлялось целесообразным из-за уменьшения спектральной чувствительности при температурном сдвиге края в коротковолновую область.

С ростом интенсивности облучения (мощности ЛИ) скорость температурной деградации V_{oc} снижается, тогда как изменение коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики (FF) имеет обратный вид. Значения температурных коэффициентов V_{oc} и FF ($\Delta V_{oc}/\Delta T$ и $\Delta FF/\Delta T$, соответственно) в зависимости от мощности ЛИ представлены в табл. 1. Форма температурных зависимостей кпд (рис. 2) в основном определяется

Таблица 1. Влияние температуры и мощности ЛИ на параметры ФЭП ЛИ

$P, \text{ мВт}$	$\Delta V_{oc}/\Delta T, \text{ В} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta FF/\Delta T, \text{ \%} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
150	1.57	0.062
300	1.53	0.073
500	1.47	0.077

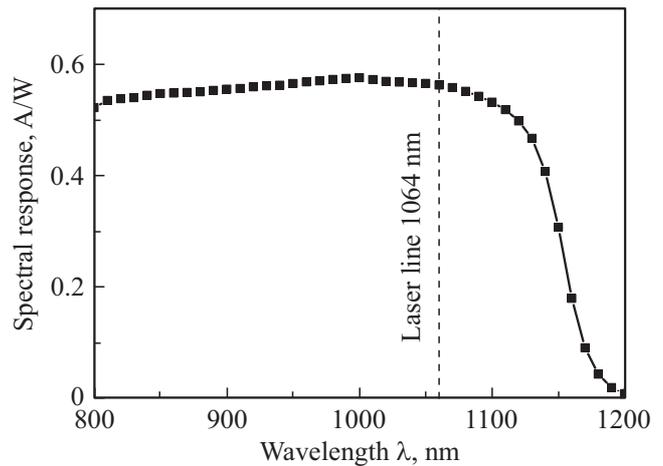


Рис. 1. Спектральная чувствительность ФЭП ЛИ.

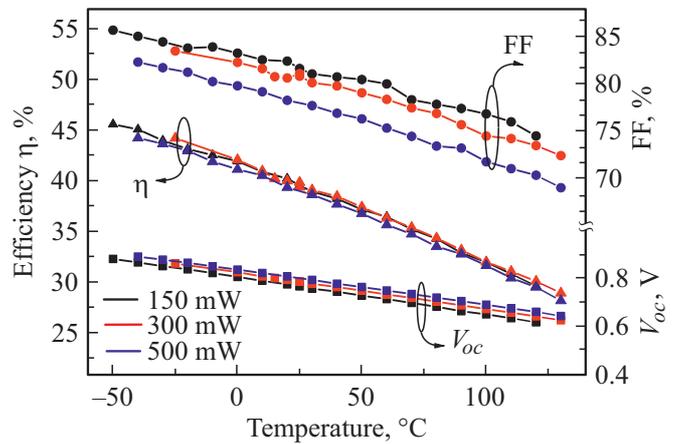


Рис. 2. FF, V_{oc} и кпд ФЭП ЛИ с $S = 0.1 \text{ см}^2$ (лазер с $\lambda = 1064 \text{ нм}$, непрерывный режим генерации).

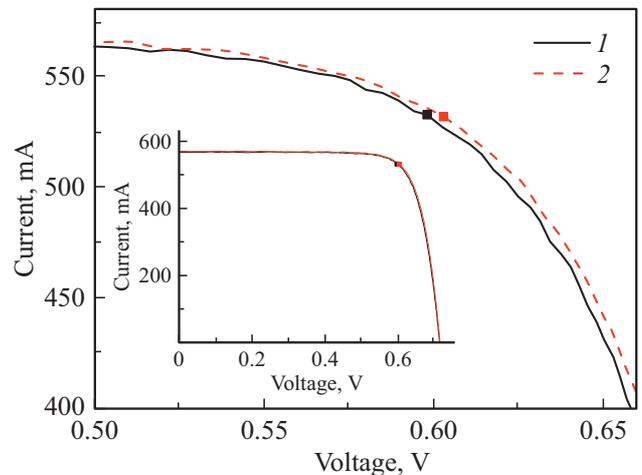


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики ФЭП ЛИ на основе InGaAs до (1) и после (2) монтажа с использованием низкотемпературной паяльной пасты. На вставке — ВАХ во всем измеряемом диапазоне.

совместным влиянием V_{oc} и FF и практически не зависит от изменения величины фоточувствительности с температурой. Усредненная скорость падения КПД ФЭП составила 0.1% на градус для рассматриваемых мощностей ЛИ и температурного диапазона.

Температурные исследования показали, что необратимой деградации параметров ФЭП ЛИ не происходит вплоть до $T \approx 130^\circ\text{C}$. Тем не менее, в силу относительно малой глубины залегания $p-n$ -перехода ($\sim 500 \text{ нм}$) режимам пайки преобразователей в модуль должно быть уделено особое внимание. Монтаж проводился методом оплавления паяльной пасты в атмосфере инертного газа (аргона). Использовались сплавы олова с висмутом (Sn42Bi58) с температурой плавления 138°C . Пайка каждого образца проводилась отдельным процессом (динамичный нагрев с „подскоком“ температуры) с одновременным монтажом фронтального и тыльного контактов. Вольт-амперные характеристики ФЭП ЛИ до (кривая 1) и после (кривая 2) монтажа приведены в общем виде (на вставке) и в укрупненном масштабе на рис. 3. Идентичность кривых 1, 2 подтверждает отсутствие уменьшения FF и V_{oc} преобразователя.

4. Конструкция многоэлементного фотоэлектрического модуля

Конфигурация фронтальной металлизации ФЭП с широкой токосборной шиной (500 мкм) в центре (рис. 4) обеспечивала уменьшение оптических потерь на затенение, а выбранный шаг контактной сетки (125 мкм) способствовал одновременному снижению омических потерь из-за сопротивления растекания, что в итоге приводило к увеличению FF. Параметры смонтированных в ФЭМ преобразователей представлены в табл. 2 (I_{sc} — ток короткого замыкания, I_{mpp} , V_{mpp} , P_{mpp} — ток, напряжение и мощность в точке оптимальной нагрузки).

Для снижения оптических потерь и минимизации габаритных размеров модуля (рис. 4, 5) преобразователи монтировались с наименьшим расстоянием между ними (0.2 мм). Каждый ФЭП устанавливался на несущую печатную плату с высокой теплопроводностью (2.0 Вт/м·К), термостойкостью и совместимостью по коэффициенту термического расширения с подложкой GaAs. Многослойная плата „алюминий–поли-

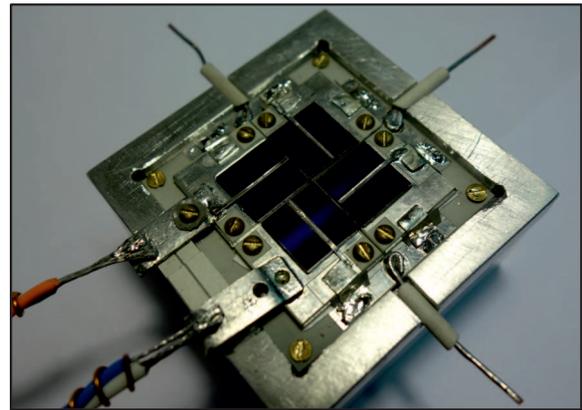


Рис. 4. Внешний вид многоэлементного ФЭМ.

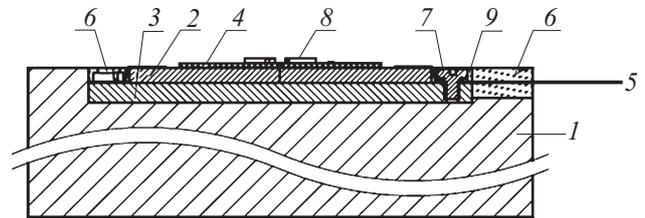


Рис. 5. Вид модуля ФЭП в разрезе: 1 — радиатор, 2 — плата, 3 — коммутационная плата, 4 — ФЭП ЛИ с $\lambda = 1064 \text{ нм}$, 5 — вывод, 6 — термопрокладка, 7, 8 — винты, 9 — шайба.

имид–фольга“ обеспечивала электрическую изоляцию и коммутацию ФЭП [12]. Несущие платы крепились на теплоотводящем радиаторе через промежуточное коммутационное основание (рис. 5). Введение коммутационной платы позволяет максимально повысить плотность „упаковки“ ФЭП, упростить процесс сборки модуля и коммутации ФЭП. Блочная конструкция ФЭМ позволяет заменить в случае необходимости воздушное охлаждение на другие варианты отвода тепла, а также заменить любой из фотоэлементов без проведения полной разборки модуля. ФЭП ЛИ соединялись в последовательную цепочку для увеличения выходного напряжения модуля. Все крепежные отверстия вынесены за пределы чипов, что уменьшало риск их повреждения при монтаже.

5. Характеристики, применение и дальнейшее усовершенствование модуля

Эффективность изготовленного и протестированного при равномерной освещенности модуля (Xe-лампа, рис. 6) составила 31.5% при мощности ЛИ $P = 1.5 \text{ Вт/см}^2$ (оценка КПД для фоточувствительной поверхности преобразователей).

Представленный вариант ФЭМ предназначен для экспериментов по воздействию прямых лазерных потоков (измерение рабочей температуры, определение степени

Таблица 2. Параметры ФЭП после пайки (мощность ЛИ $P \approx 1 \text{ Вт}$, равномерная освещенность)

Номер образца	$I_{sc}, \text{ А}$	$V_{oc}, \text{ В}$	$I_{mpp}, \text{ А}$	$V_{mpp}, \text{ В}$	$P_{mpp}, \text{ Вт}$	FF, %	$\eta, \%$
1	0.564	0.711	0.522	0.602	0.314	78.2	31.3
2	0.564	0.714	0.531	0.603	0.320	78.2	31.5
3	0.567	0.714	0.520	0.609	0.317	78.2	31.4
4	0.570	0.714	0.532	0.603	0.321	78.7	31.6

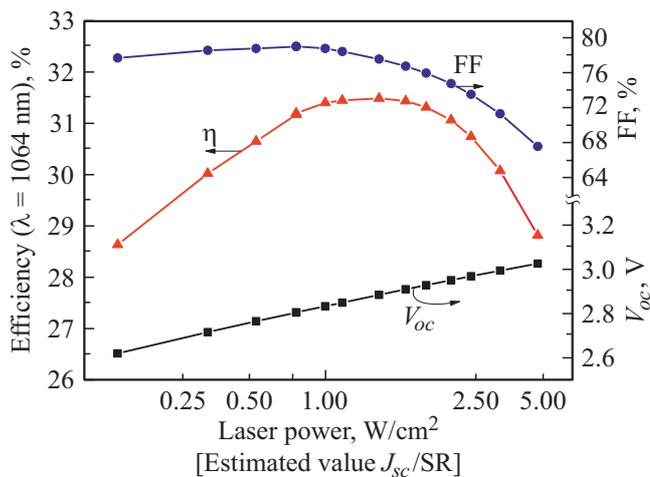


Рис. 6. FF, V_{oc} и кпд модуля ФЭП ЛИ. Оценка кпд при равномерной освещенности; эквивалентная мощность лазерного излучения определялась как J_{sc}/SR , SR — спектральная чувствительность в $A \cdot cm^{-2}/W$.

падения кпд под влиянием неравномерного облучения, оценка локальных перегревов, деградация на отдельных участках контактных/просветляющих покрытий, прогнозирование функционирования при значительном увеличении количества фотоэлементов и т.п.) с целью последующего внесения конструктивных изменений.

По значениям кпд (η) установленные в модуль преобразователи с $S = 1 cm^2$ уступают полученным в ФТИ им. А.Ф. Иоффе аналогам с площадью $S = 0.1 cm^2$ ($\eta > 44\%$ [6], оценка для центральной области ФЭП, конфигурация контактной структуры с периферическим расположением токособирающих шин). Моделирование характеристик преобразователей в работе [5] показывает, что на одних и тех же гетероструктурах кпд образцов указанных площадей различается на $\sim 6.5\%$ (табл. 3). Монтаж ФЭП в модуль не приводит к заметному суммарному падению эффективности (табл. 2), поэтому уже сейчас существуют резервы для повышения его кпд до $\sim (37-38)\%$.

Разработанный модуль ориентирован на преобразование световой мощности, передаваемой коллимированными потоками ЛИ через открытое пространство. По данным [13] для системы наведения [14] и расстояния на атмосферной трассе 1.3 км расходимость луча лазера с $\lambda = 1064 nm$ в идеальных условиях составляет $\sim 3 m$, что в 20 раз меньше расходимости лазерного пучка с $\lambda = 809 nm$. В условиях турбулентной атмосферы снижа-

Таблица 3. Максимально достижимые кпд фотопреобразователей на основе $In_{0.24}GaAs/GaAs$ ($\lambda = 1064 nm$, тока 1 A [5])

Размер ФЭП, мм	3 × 3	10 × 10	20 × 20
кпд преобразователя, %	57.5	51	46

ется интенсивность и однородность облучения, а область пятна размывается до 10 см [15], поэтому в усовершенствованном варианте ФЭМ предполагается увеличение площади фоточувствительной поверхности. Рост числа чипов в приемнике в свою очередь позволит добиться лучшего соответствия формы облучаемой поверхности круглому полю засветки лазером.

6. Заключение

В работе представлены результаты практической реализации ФЭМ для приема–преобразования ЛИ инфракрасного диапазона ($\lambda = 1064 nm$). Использование для ФЭП метаморфных структур $GaInAs/GaAs$ с градиентным буферным слоем позволило реализовать кпд модуля $> 30\%$ при мощности подаваемого ЛИ $1.5 W/cm^2$ с перспективой повышения эффективности до $37-38\%$. Разработанный ФЭМ ориентирован на преобразование световой мощности, передаваемой коллимированными потоками ЛИ через открытое пространство. Развитие подхода предполагает увеличение размера ФЭМ для перехвата мощностных потоков, размываемых в условиях турбулентной атмосферы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г.Г. Райкунов, В.А. Комков, В.К. Сысоев, В.М. Мельников, под ред. Г.Г. Райкунова (М., Российский университет дружбы народов, 2017).
- [2] Электронный ресурс http://sintecclaser.ru/fiber_lasers/
- [3] Электронный ресурс http://ntoire-polus.ru/products_low_dlm.html
- [4] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham. IEEE Electron Dev. Lett., **13** (6), 317 (1992).
- [5] В.М. Емельянов, С.А. Минтаиров, С.В. Сорокина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. ФТП, **50** (1), 125 (2016).
- [6] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts. AIP Conf. Proc., **2012**, 110002 (2018); doi: 10.1063/1.5053550
- [7] D.V. Rybalchenko, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy. J. Phys.: Conf. Ser., **741**, 012086 (2016).
- [8] N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, A.M. Nadtochiy, V.N. Nevedomskiy, D.V. Rybalchenko, M.Z. Shvarts. Electron. Lett., **53** (3), 173 (2017).
- [9] А.Е. Маричев, Р.В. Левин, А.Б. Гордеева, Г.С. Гагис, В.И. Кучинский, Н.Д. Прасолов, Н.М. Шмидт. Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век, **8**, 27 (2016).
- [10] Р.В. Левин, А.Е. Маричев, М.З. Шварц, Е.П. Марухина, В.П. Хвостиков, Б.В. Пушный, М.Н. Мизеров, В.М. Андреев. ФТП, **49** (5), 715 (2015).
- [11] А.Е. Marichev, B.V. Pushnyi, R.V. Levin. J. Phys.: Conf. Ser., **690**, 012010 (2016).
- [12] Электронный ресурс <https://www.rezonit.ru/metbase>

- [13] V. Kapranov, V. Tugaenko, D. Marakasov, A. Kudryavtsev. Proc. SPIE, **9680** [21st Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics] 96801C (2015). doi: 10.1117/12.2205492
- [14] В.А. Корнилов, И.С. Мацак, В.Ю. Тугаенко, Е.С. Сергеев. Патент РФ № 0002663121 от 7.08.2018.
- [15] В.Ю. Тугаенко. Доклад на НТС ГК „Роскосмос“ 15 июня 2017 г.

Редактор Л.В. Шаронова

Module of laser-radiation ($\lambda = 1064$ nm) photovoltaic converters

V.P. Khvostikov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov,
N.S. Potapovich, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Here we present results of study and development of a module designed for the distant energy transmission via atmospheric traces. The four-cell module based on single-junction metamorphic metalloorganic vapor-phase epitaxy grown InGaAs/GaAs converters has the open-circuit voltage of ~ 3 V. It is shown that the monochromatic efficiency (the operating wavelength of 1064 nm) of this module is 31.5% at uniform Xe-lamp exposure and radiation power of 1.5 W/cm^2 .