

## Разработка технологии изготовления фотоприемников мощного лазерного излучения на длину волны 1.06 мкм

© А.Е. Маричев, В.С. Эполетов, Б.В. Пушный, А.С. Власов, А.Е. Лихачев

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

E-mail: Segregate1@yandex.ru

Поступила в Редакцию 21 июня 2023 г.

В окончательной редакции 6 июля 2023 г.

Принята к публикации 12 сентября 2023 г.

Представлены конструкции и способ изготовления активной области фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения. По результатам измерений выращенных образцов был достигнут кпд 34.5%. Предложена перспективная конструкция каскадного фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения, в котором соединение каскадов выполнено с помощью каналов проводимости на основе микрокристаллитов GaP.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический преобразователь, лазерное излучение, туннельный диод, микрокристаллиты, фосфид индия.

DOI: 10.61011/FTP.2023.07.56835.5339

В настоящее время солнечная энергия является надежным и практически неиссякаемым источником энергии. Для передачи энергии на Земную поверхность и между спутниками может использоваться мощный лазер, а в качестве приемника излучения может выступить фотоэлектрический преобразователь лазерного излучения (ФЭП ЛИ) [1–4]. Такие системы передачи энергии могут быть использованы на Земле для энергосистем в местах со сложным рельефом (горах) и системах подзарядки беспилотных летательных аппаратов.

Лазеры на иттрий-алюминиевом гранате (Nd:YAG), работающие на длине волны 1.06 мкм, способны обеспечить довольно малую расходимость луча без применения дополнительной сложной оптики, что делает возможным использовать их в таких системах. Четверной твердый раствор  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  с шириной запрещенной зоны  $E_g \sim 1.10$  эВ с  $x \sim 0.15–0.22$  и  $y \sim 0.25–0.46$ , согласованный по периоду решетки с InP, является перспективным материалом для создания ФЭП ЛИ с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм.

Система четверных твердых растворов GaInAsP имеет большие области спиноподобного распада [5], а указанные составы находятся вблизи контура неустойчивости, что осложняет получение кристаллически совершенных толстых слоев GaInAsP с толщинами, необходимыми для эффективного поглощения излучения.

Нами было установлено [6,7], что слои твердых растворов для активной области  $Ga_{0.22}In_{0.78}As_{0.46}P_{0.54}$  удовлетворительного качества могут быть получены с толщинами  $\geq 200$  нм. При увеличении толщины наблюдалось резкое ухудшение качества слоев. Для создания необходимой толщины был предложен метод (см. работу [7]) изготовления слоистой структуры, состоящей из следующих слоев: твердого раствора необходимого состава толщиной  $d = 200$  нм и слоев InP с  $d = 20$  нм, с общей толщиной, необходимой для полного поглощения излучения в 3.0–3.5 мкм.

Авторами предложено использовать вариант ФЭП ЛИ с вводом излучения со стороны подложки („обратная“ структура). Гетероструктура GaInAsP/InP была выращена методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСГФЭ) [8] на подложке  $n$ -InP. Одной из причин выбора этой подложки является то обстоятельство, что подложка прозрачна для излучения на длине волны  $\lambda = 1064$  нм. Такая подложка позволяет изготавливать сетку контактов меньшей площади, чем у фотодиодов с засветкой со стороны активного слоя. Структура ФЭП ЛИ, предназначенного для приема излучения со стороны подложки, показана на рис. 1. Толщины слоев рассчитаны по закону Бугера–Ламберта–Бера при оптимальной степени легирования для составов твердых растворов InGaAsP с  $E_g = 1.05$  эВ, слегка несогласованных по постоянной решетки с InP. [9].

За счет того что в такой конструкции верхний контакт наносится на подложку, а не на тонкие слои эмиттера (как в классических ФЭП), уменьшается площадь контактной сетки. Это уменьшает потери на „затенение“ в ФЭП ЛИ и уменьшает омические потери в самом контакте.

На приемную поверхность ФЭП ЛИ нанесли антиотражающее покрытие, на основе пленки  $Ta_2O_5$  толщиной 140 нм.

На рис. 2 представлена зависимость спектральной чувствительности от длины волны, на рис. 3 — фактор заполнения, напряжение холостого хода и кпд. Измерения проводились на приборах с площадью засветки  $3.5 \times 3.5$  мм.

При плотности оптической мощности  $10$  Вт/см<sup>2</sup> регистрировался кпд ФЭП 34.5% при преобразовании лазерного излучения  $\lambda = 1064$  нм.

Для увеличения мощности облучения (оптической мощности) ФЭП ЛИ и исключения эффекта „насыщения“ предпочтительно использовать каскадные (слои-

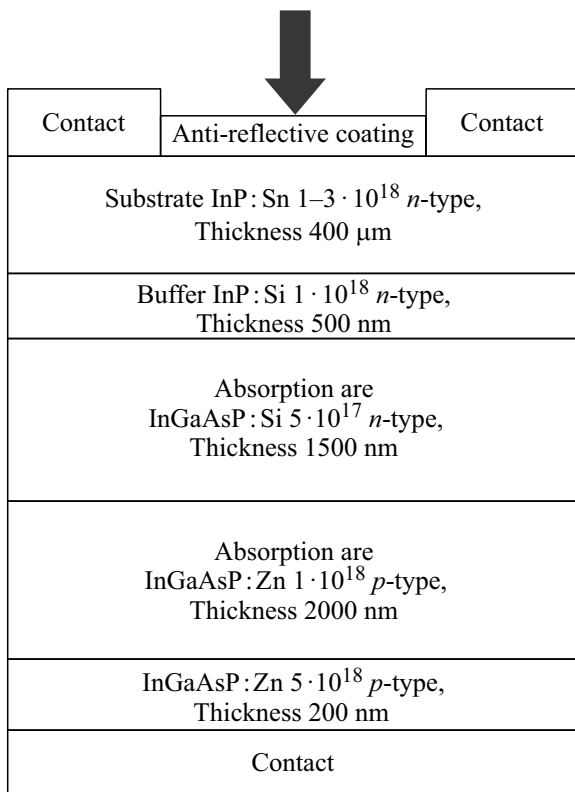


Рис. 1. Структура ФЭП ЛИ на основе GaInAsP с инверсной засветкой.

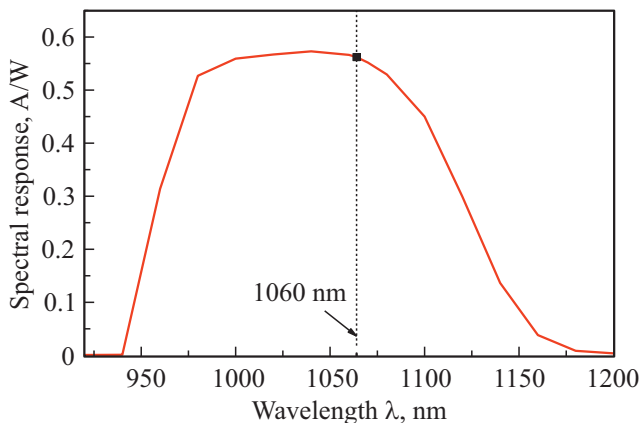


Рис. 2. Зависимость спектрального отклика от длины волны излучения при равномерном облучении.

стые) фотоприемники [10]<sup>1</sup>. Обычно в качестве соединительного элемента каскадных приборов используется туннельный *p-n*-переход, однако при значительном увеличении мощности падающего излучения генерируемый ток может превышать пиковый ток туннельных

<sup>1</sup> См. О.Н. Крохин [10]: „По-видимому, можно попытаться сделать преобразователь в виде слоистой структуры, в которой излучение проходит последовательно через несколько слоев, постепенно поглощаясь, а электрическую связь между слоями следует осуществлять по последовательной схеме. Тогда такой преобразователь на выходе даст более высокое напряжение“.

переходов, что приводит к увеличению сопротивления структуры и снижению эффективности преобразования излучения [11]. Решением этой проблемы служит изготовление каналов проводимости посредством введения массива микрокристаллических включений в область пространственного заряда (ОПЗ) между соседними *p-n*-переходами. Это позволяет полностью исключить туннельные *p-n*-переходы и обеспечить омическое токопрохождение по данным каналам.

Для создания такого соединительного элемента необходимо определить с материалом, из которого должны изготавливаться микрокристаллиты. Этот материал должен соответствовать следующим условиям.

1. Слабое поглощение оптического излучения, преобразуемого областями поглощения.
2. Материал не должен образовывать сплошной слой на границе с фотоактивным материалом, а лишь отдельные, подходящие по размерам кристаллы.

Для создания микрокристаллитов подходит GaP, имеющий значительное отличие по постоянной решетки от InP и большую ширину запрещенной зоны ( $E_g = 2.261$  эВ), что позволяет получить микрокристаллиты, которые не будут поглощать принимаемую энергию лазера.

Все структуры были выращены методом МОСГФЭ. Температура роста составляла  $600^\circ\text{C}$ , давление в реакторе 100 мбар, частота вращения подложки равнялась 100 об/мин. Газом-носителем выступал водород с точкой росы не хуже  $100^\circ\text{C}$ , суммарный поток через реактор составлял 5.5 л/мин.

Был изготовлен прототип двухкаскадного ФЭП ЛИ с соединительным элементом на основе микрокристаллитов GaP, замыкающих ОПЗ *p-n*-перехода InP. Структура прототипа представлена на рис. 4.

Данная конструкция ФЭП ЛИ решает несколько проблем, существующих в однокаскадном ФЭП ЛИ:

- 1) уменьшается вероятность эффекта насыщения;
- 2) уменьшается электрическая емкость и, следовательно, повышаются частотные характеристики для цепей передачи сигналов;

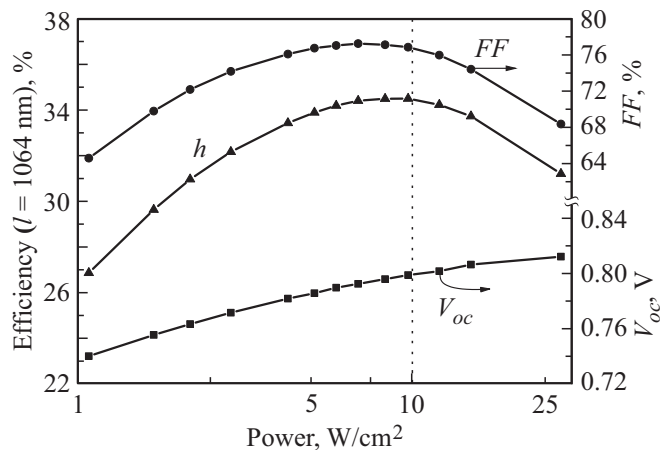
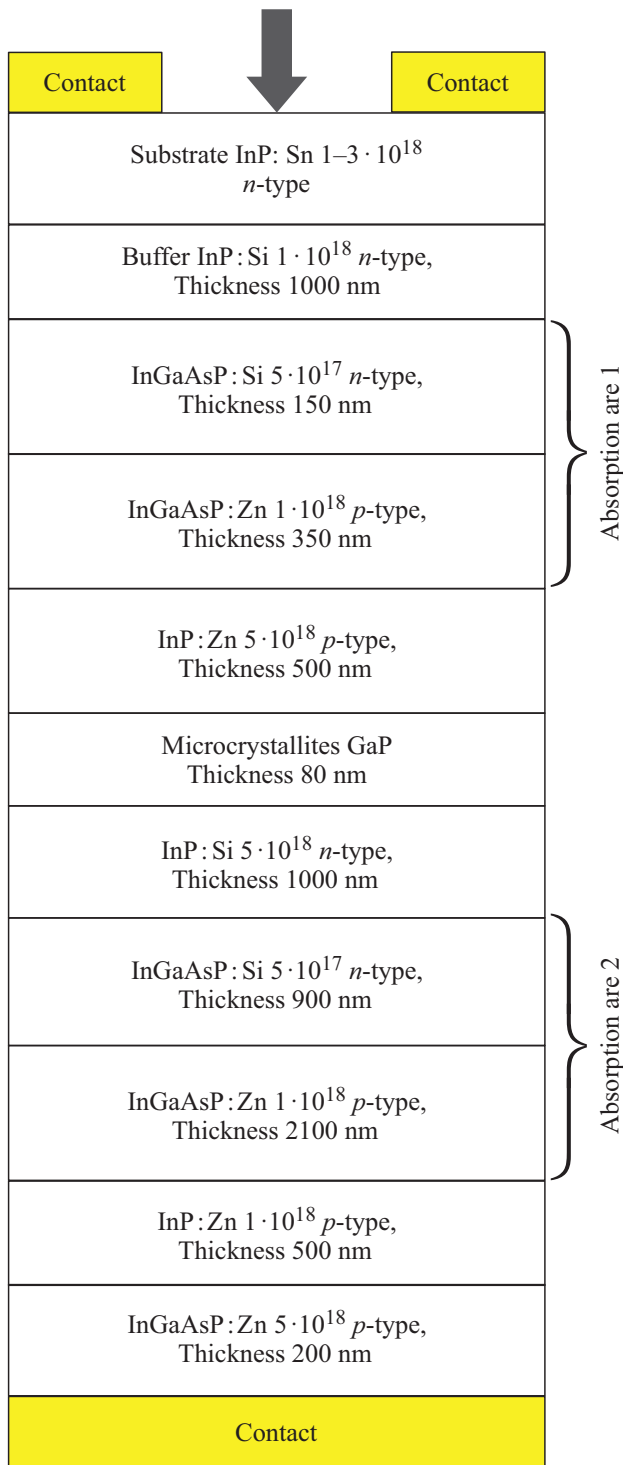


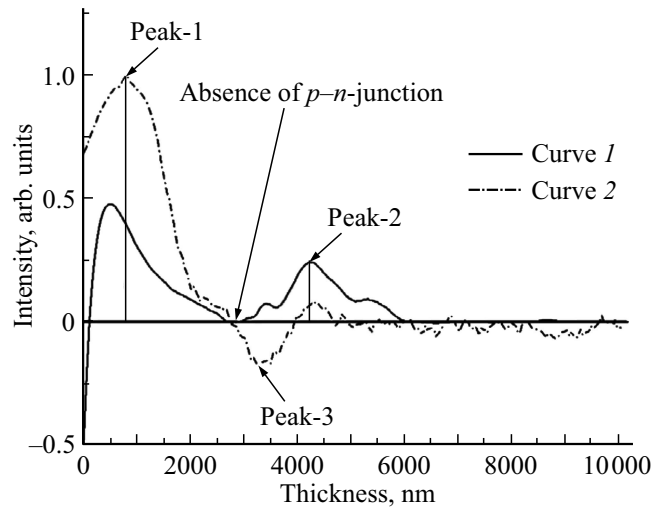
Рис. 3. Зависимость кпд  $V_{oc}$  и  $FF$ -фотопреобразователя, работающих на длине волны 1.06 мкм, от мощности ЛИ.

3) уменьшаются потери на нагрев вследствие уменьшения фототока.

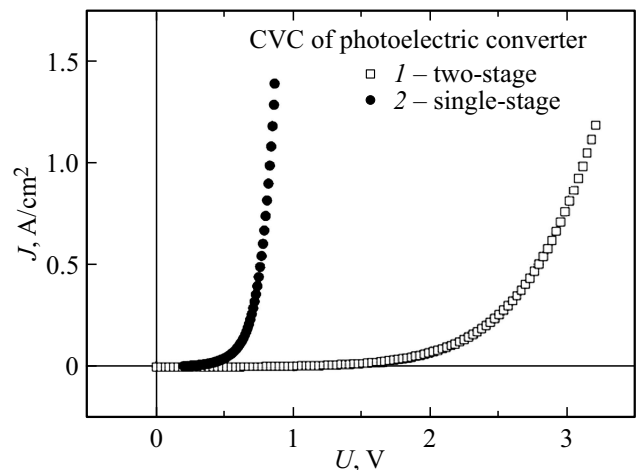
Для подтверждения отсутствия встречно-включенного  $p-n$ -перехода и определения положения областей пространственного заряда было проведено исследование



**Рис. 4.** Структура ФЭП с двумя  $p-n$ -переходами (каскадами). Толщина области поглощения 1–0.5 мкм, толщина области поглощения 2–3 мкм. Контакт 1 к  $n$ -слою — AuGe/Ni/Au, контакт 2 к  $p$ -слою — AgMn/Ni/Au.



**Рис. 5.** Графики ТИЭЗ двухкаскадных ФЭП с незамкнутым (1) и замкнутым (2) соединительными элементами. Структура ФЭП с двумя  $p-n$ -переходами (каскадами).



**Рис. 6.** ВАХ ФЭП с одним (1) и двумя (2)  $p-n$ -переходами (каскадами).

методом тока, индуцированного электронным зондом (ТИЭЗ). Исследования методом ТИЭЗ проводились на растровом электронном микроскопе Series 4-88 DV100 (CAMSCAN, Англия) с блоком усилителя „ЕВІС“. Зависимости интенсивности от глубины представлены на рис. 5. Так, на кривой 1 кроме пиков, присущих  $p-n$ -переходам (Пик-1, Пик-2), присутствует дополнительный пик (Пик-3)  $p-n$ -перехода, работающий во встречном направлении. Особенности Пика-3 присущи незамкнутому соединительному элементу. Это говорит о том, что микрокристаллиты не замыкают соединительный элемент, а на кривой 2 отсутствует пик, присущий  $p-n$ -переходу. Кроме этого, Пик-1 и Пик-2 примерно одинаковые, что говорит о работе обоих каскадов.

При сравнении ВАХ характеристик однокаскадного ФЭП ЛИ (рис. 1) и двухкаскадного ФЭП ЛИ (см. рис. 4) в ВАХ (см. рис. 6) двухкаскадного ФЭП ЛИ наблюдается

ся увеличение напряжения отсечки, что говорит о работе обоих каскадов.

В результате выполненной работы:

1) разработана технология изготовления фотоприемников мощного лазерного излучения на длину волны  $\lambda = 1064$  нм. По результатам измерений был достигнут КПД 34.5% при мощности засветки 10 Вт/см<sup>2</sup>.

2) показано, что конструкция ФЭП ЛИ с соединительным элементом на основе микрокристаллитов работает, при этом работают оба каскада.

### Благодарности

ТИЭЗ-исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] T.P.P. Anand, R. Pandiarajan, P. Raju. *Int. J. Mech. Eng. Res.*, **5** (1), 137 (2015).
- [2] M. Mori, H. Kagawa, Y. Saito. *Acta Astronaut.*, **59** (1), 132 (2006).
- [3] L. Summerer, O. Purcell. *Energy Systems Conf. paper on the Int. Conf. on Space Optical Systems and Applications* (Tokyo, 2009). <https://www.esa.int/gsp/ACT/doc/POW/ACT-RPR-NRG-2009-SPS-ICSOS-concepts-for-laser-WPT.pdf>
- [4] Y.A. Abdel-Hadi. *NRIAG J. Astron. Geophys.*, **9**, 558 (2020).
- [5] K. Onabe. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **21** (5R), 797 (1982).
- [6] И.П. Ипатова, В.Г. Малышкин, А.Ю. Маслов, В.А. Щукин. *ФТП*, **27** (2), 285 (1993).
- [7] А.Е. Маричев, Р.В. Левин, А.Б. Гордеева, Г.С. Гатис, В.И. Кучинский, Б.В. Пушный, Н.Д. Прасолов, Н.М. Шмидт. *Письма ЖТФ*, **43** (2), 3 (2017).
- [8] А.Е. Маричев, В.П. Хвостиков. *Тез. докл. 15 Всеросс. молодежной конф. по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике* (Санкт-Петербург, 2013) с. 24.
- [9] А.Е. Маричев. Автореф. канд. дис. *Исследование твердых растворов InGaAsP для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения* (СПб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2023).
- [10] O.N. Krokhin. *Physics-Uspexhi*, **49** (4), 425 (2006).
- [11] D. Masson, F. Proulxand, S. Fafard. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **23**, 1687 (2015).

Редактор А.Н. Смирнов

### Development of the technology for production power laser converters on wavelength 1.06 $\mu\text{m}$

A.E. Marichev, V.S. Epoletov, B.V. Pushnyi, A.S. Vlasov, A.E. Lihachev

Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The technology for production one and two-cascade power laser converters was presented in this paper. According to the measurement results of the grown samples, an efficiency of 34.5% was achieved. A promising design of a cascade photoelectric converter is proposed, in which the cascades are connected with using conduction channels based on GaP microcrystallites.