



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-1-75-85  
УДК 629.7.064.5  
EDN: EALRET

Научная статья / Research article

## Высокоэффективные фотоэлектрические преобразователи мощного лазерного излучения

В.М. Андреев<sup>✉</sup>, Н.А. Калюжный<sup>ORCID</sup>, А.В. Малевская<sup>ORCID</sup>,  
М.В. Нахимович<sup>ORCID</sup>, М.З. Шварц<sup>ORCID</sup>

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

✉ vmandreev@mail.ioffe.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 27 сентября 2023 г.  
Доработана: 10 ноября 2023 г.  
Принята к публикации: 18 ноября 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Фотоэлектрическое преобразование лазерного излучения нашло широкое применение в волоконно-оптических линиях связи. Передача энергии по лазерному лучу также актуальна для систем дистанционного энергопитания на Земле и в космосе. Данные системы могут найти применение для подпитки беспилотных летательных аппаратов, для передачи лазерной энергии между космическими аппаратами и с космических солнечных батарей на Землю. Одной из главных задач при создании таких систем является обеспечение высокой эффективности фотоэлектрических преобразователей при повышенной мощности (более 100 Вт/см<sup>2</sup>) лазерного излучения. Представлены результаты исследований и разработок фотоэлектрических преобразователей мощного лазерного излучения на основе наногетероструктур, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии. Повышение КПД достигнуто путем встраивания в структуру тыльного комбинированного отражателя «диэлектрик-серебро». Увеличение генерируемого напряжения достигнуто путем смещения области объемного заряда в широкозонный слой p-GaAs-p-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As гетероперехода. Благодаря дополнительному снижению омических потерь достигнуты значения КПД > 60 % при мощности лазерного излучения ( $\lambda = 860$  нм) в диапазоне 50–400 Вт/см<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический преобразователь, AlGaAs/GaAs гетероструктура, лазерное излучение, брэгговский отражатель

### Благодарности

Авторы благодарят С.А. Минтаирова, Р.А. Салия, Ф.Ю. Солдатенкова, П.В. Покровского и Д.А. Малевского за помощь в экспериментах и полезные обсуждения.

### Для цитирования

Андреев В.М., Калюжный Н.А., Малевская А.В., Нахимович М.В., Шварц М.З. Высокоэффективные фотоэлектрические преобразователи мощного лазерного излучения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 1. С. 75–85. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-1-75-85>



## Highly Efficient Photovoltaic Laser Power Converters

Viacheslav M. Andreev<sup>✉</sup>, Nikolay A. Kalyuzhnyy<sup>✉</sup>, Aleksandra V. Malevskaya<sup>✉</sup>,  
Mariia V. Nakhimovitch<sup>✉</sup>, Maxim Z. Shvarts<sup>✉</sup>

Ioffe Institute, *St. Petersburg, Russia*

✉ vmandreev@mail.ioffe.ru

### Article history

Received: June 27, 2023

Revised: November 10, 2023

Accepted: November 18, 2023

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** Photovoltaic conversion of laser radiation has found wide application in fiberoptic communication lines. Energy transfer via a laser beam is also relevant for remote power supply systems on Earth and in space. These systems can be used to power unmanned aerial vehicles, to transfer laser energy between spacecraft and from space solar panels to Earth. One of the main tasks in creating such systems is to ensure high efficiency of photovoltaic converters at high power (more than 100 W/cm<sup>2</sup>) of laser radiation. The article presents the results of research and development of photovoltaic converters of high-power laser radiation based on nanoheterostructures obtained by MOCVD epitaxy. The reduction of losses was achieved by embedding the “dielectric-silver” rear combined reflector into the structure. An increase in the generated voltage was achieved by shifting the volume charge region into the wide-gap layer of the p-GaAs-n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterojunction. Thanks to an additional reduction in ohmic losses, efficiency values of > 60 % have been achieved at laser radiation ( $\lambda = 860$  nm) powers in the range of 50–400 W/cm<sup>2</sup>.

**Keywords:** photovoltaic converter, AlGaAs/GaAs heterostructure, laser radiation, Bragg reflector

### Acknowledgements

The authors thank S.A. Mintairov, R.A. Salia, F.Y. Soldatenkov, P.V. Pokrovsky and D.A. Malevsky for their help in experiments and useful discussions.

### For citation

Andreev VM, Kalyuzhnyy NA, Malevskaya AV, Nakhimovitch MV, Shvarts MZ. Highly efficient photovoltaic laser power converters. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(1):75–85. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-1-75-85>

### Введение

Для дальних волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) наибольшее распространение получили фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) лазерного излучения на основе системы InGaAs/InP, перекрывающие спектральный диапазон излучения лазеров 1,55 мкм, в котором достигнуты минимальные оптические потери и минимальная дисперсия в оптических волокнах, что очень важно для ВОЛС большой протяженности. Однако для ВОЛС малой протяженности (внутриобъектовых и др. длиной менее 1 км) затухание излучения  $\lambda = 0,8$  мкм составляет менее 1 дБ и потери в волокне не играют заметной роли. ФЭП на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур обеспечивает максимальный КПД при длине волны лазерного излучения в диапазоне

800–860 нм, что делает их наиболее перспективными для систем передачи энергии по лазерному лучу. Таким образом, для коротких ВОЛС, а также для передачи энергии по открытому оптическому каналу на Земле и в космосе использование ФЭП на основе AlGaAs/GaAs гетероструктуры не только приемлемо, но и может быть в ряде случаев предпочтительным.

Впервые гетероструктурные AlGaAs/GaAs фотоэлементы были созданы в ФТИ им. А.Ф. Иоффе под руководством Ж.И. Алферова [1–4]. Использование этих гетероструктур для фотопреобразователей мощного лазерного излучения обеспечивает следующие преимущества:

– GaAs ФЭП имеют большее значение КПД. Теоретическое значение КПД в GaAs ФЭП, работающем в фотовольтаическом режиме (без внешнего напряжения) для мощного (более 10<sup>2</sup> Вт/см<sup>2</sup>)

лазерного излучения ( $\lambda = 0,85$  мкм), превышает 80 %;

– GaAs ФЭП имеют лучшую температурную стабильность генерируемого напряжения и, следовательно, меньшее значение температурного коэффициента КПД  $\eta_T = 1,4 \cdot 10^{-3}$  град $^{-1}$  при плотности фототока 30 А/см $^2$  (в 1,8 раза меньше, чем в ФЭП на основе Si и в 3 раза меньше, чем в InGaAs ФЭП).

Если при использовании ФЭП в системах передачи информации главным требованием является повышение быстродействия ФЭП, то в

системах передачи энергии по лазерному лучу главными параметрами ФЭП являются предельная генерируемая мощность и КПД [5–11].

Наибольший интерес для систем передачи энергии представляют длины волн, соответствующие имеющимся мощным источникам лазерного излучения и окнам прозрачности как оптического волокна, так и атмосферы: 808, 970, 1070, 1300 и 1550 нм (рис. 1).

На рис. 1 сверху приведены спектры фототока ФЭП на основе различных материалов, указанных в нижней части.

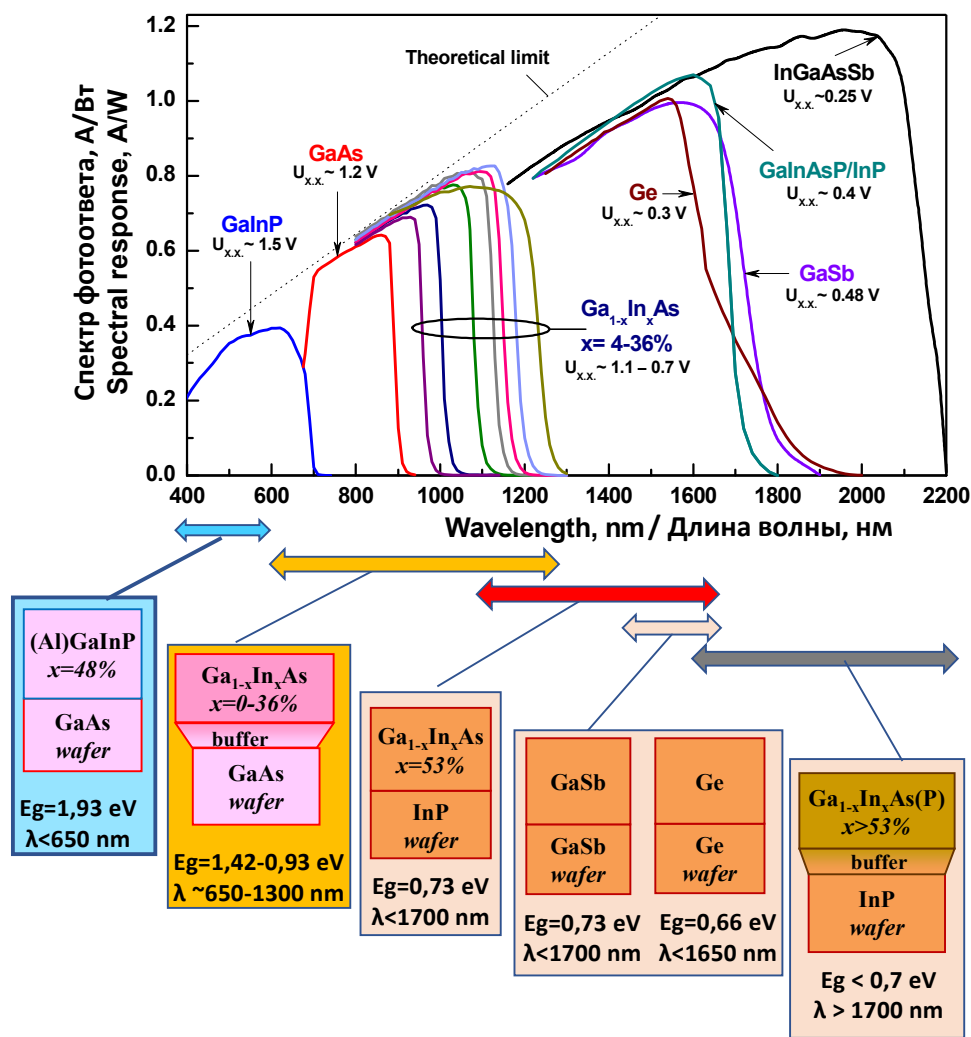


Рис. 1. Спектры фототока и соответствующие структуры фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения

Источники: составлено авторами Н.А. Калужным, М.З. Шварцем

Figure 1. Spectral photoresponse and corresponding structures of laser power photovoltaic converters

Source: made by the authors N.A. Kalyuzhnyy, M.Z. Shvarts

Для создания «длинноволновых» ФЭП мощного лазерного излучения в диапазоне 1,3–1,55 мкм перспективны материалы, в которых достигнут КПД ~45 %:

– In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As/InP (край поглощения ~ 1,65 мкм) [12];

– GaSb (~1,68 мкм) [13].

ФЭП на основе полупроводников с меньшей шириной запрещенной зоны имеют меньшие значения КПД из-за потерь на термализацию, например, на основе Ge (край поглощения 1,88 мкм) [14; 15]. В «микронном» спектральном диапазоне метаморфные структуры In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As на подложках GaAs [16–18] показали эффективность более 52 % для  $\lambda = 1,06$  мкм (6,5 Вт/см<sup>2</sup>) и 55 % для  $\lambda = 1,02$  мкм (4 Вт/см<sup>2</sup>) [17] и КПД > 48 % при мощности лазерного излучения 13 Вт/см<sup>2</sup> [16].

В спектральном диапазоне 800–870 нм наибольшую эффективность имеют ФЭП на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур. Максимальные теоретические значения КПД мощных фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения с длиной волны 800–860 нм превышают 85 % при плотности излучения более 100 Вт/см<sup>2</sup> [19]. Практически достигнутые значения КПД для ФЭП на основе GaAs, составляют: КПД = 55 % при плотности мощности лазерного излучения  $P = 36$  Вт/см<sup>2</sup> [19], КПД = 54 % при  $P = 800$ – $1000$  Вт/см<sup>2</sup> [20] и КПД = 60 % при  $P = 10$  Вт/см<sup>2</sup> [21]. Рекордное значение КПД ~ 69 % получено [22] при  $P = 11$  Вт/см<sup>2</sup> как за счет смещения области пространственного заряда фотоактивного гетероструктурного *p-n* перехода в область широкозонного слоя AlGaAs, так и за счет тыльного отражателя.

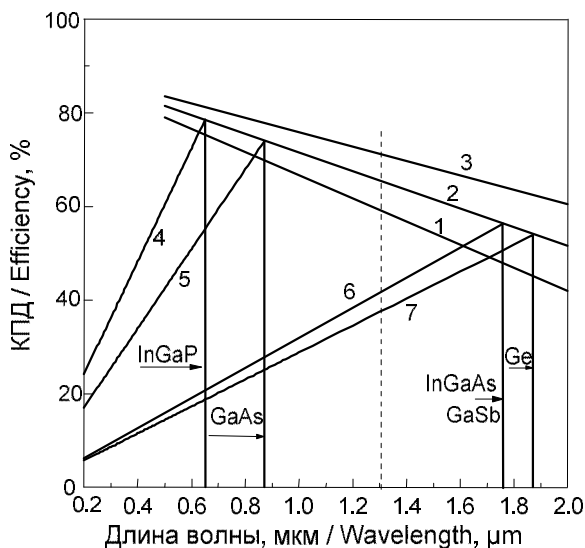
### 1. Предельные теоретические значения КПД фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения

Полупроводниковые соединения типа АЗВ5 с «прямой» структурой зон являются наиболее перспективными материалами для создания мощных фотопреобразователей. AlGaAs/GaAs, InGaAsP/InP и GaSb являются материалами, на основе которых могут быть созданы такие ФЭП. При этом GaAs обеспечивает эффективное преобразование лазерного излучения в диапазоне длин волн 0,8–0,87 мкм, а на основе InGaAsP/InP и GaSb могут быть изготовлены ФЭП на спектральный диапазон излучения 1,3–1,55 мкм [23].

Согласно оценкам, представленным в разделе 1.4 монографии [1], максимальное теоретическое значение КПД преобразования лазерного излучения ( $h\nu = 1,424$  эВ,  $\lambda = 0,87$  мкм) превышает ~ 80% при 300 К (рис. 2) при величине фототока более 10 А/см<sup>2</sup>. Граничная длина волны  $\lambda_{\Gamma}$ , начиная с которой фотоны будут поглощаться в материале ФЭП с шириной запрещенной зоны  $E_g$ , равна  $\lambda_{\Gamma} = 1,24 / E_g$ . Фотоны с энергией  $h\nu > E_g$  создают «горячие» носители тока, имеющие, помимо избыточной потенциальной энергии  $E_g$ , еще и избыточную кинетическую энергию, равную разности  $h\nu - E_g$ . Однако эта кинетическая энергия быстро расходуется на нагревание кристаллической решетки (носители термализуются, т.е. приходят в тепловое равновесие с решеткой). Таким образом, в потенциальную энергию электронно-дырочных пар преобразуется лишь часть высокоэнергетичных фотонов. Значения «монохроматического» КПД (при  $h\nu = E_g$ ) показаны линиями 1, 2, и 3 на рис. 2 для трех значений фототока  $i_{\phi}$ . На этом рисунке по оси абсцисс отложена длина волны, которую в данном случае следует рассматривать как граничную длину волны для каждого полупроводникового материала. Для каждого материала значения КПД преобразования более коротковолнового по сравнению с  $\lambda_{\Gamma}$  излучения должны быть уменьшены в  $\lambda/\lambda_{\Gamma}$  раз, что в качестве примера изображено четырьмя наклонными прямыми для материалов InGaP (4) GaAs (5), GaSb, InGaAs (6) и Ge (7) и  $i_{\phi} = 1,0$  А·см<sup>-2</sup>.

Максимум для КПД идеализированного фотоэлектрического преобразователя лазерной энергии на основе каждого из выбранных материалов увеличивается с увеличением плотности фототока, т.е. с увеличением мощности лазерного излучения, и уменьшается с увеличением длины волны лазерного излучения. При этом для лазерного излучения с энергией 0,8–0,87 мкм оптимальным материалом для изготовления ФЭП является GaAs (теоретическое значение КПД > 80%), а для лазерного излучения с длиной волны 1,3–1,55 мкм полупроводники GaSb и твердые растворы InGaAsP, InGaAs (теоретическое значение КПД ~ 50 ÷ 60%).

Значения КПД на рис. 2 рассчитаны в предположении нулевых оптических потерь излучения на отражение света от поверхности ФЭП и на затенение контактами и нулевых рекомбинационных потерях фотогенерированных электронно-



**Рис. 2.** Максимальные значения монохроматического КПД для величин фототока  $i_{\phi} = 0.1; 1.0$  и  $10 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (линии 1, 2, 3, соответственно) в зависимости от граничной длины волны полупроводникового материала; 4, 5, 6, 7 — КПД преобразования энергии монохроматического излучения для идеализированных ФЭП на основе InGaP, GaAs, InGaAs (GaSb) и Ge соответственно в зависимости от длины волны преобразуемого излучения

Источник: составлено авторами В.М. Андреевым, М.З. Шварцем

**Figure 2.** Plots of maximum magnitudes of the monochromatic efficiency for photocurrent densities  $i_{\phi} = 0.1; 1.0$  and  $10 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (lines 1,2,3 respectively), which depend on boundary wavelength of the semiconductor material; lines 4, 5, 6, 7 — conversion efficiency of monochromatic radiation for idealized photovoltaic converters based on InGaP, GaAs, InGaAs (GaSb), Ge respectively which depend on wavelength of converted radiation

Source: made by the authors V.M. Andreev, M.Z. Shvarts

дырочных пар до их разделения  $p$ - $n$ -переходом. Не учитывались также потери, связанные с протеканием в объеме  $p$ - и  $n$ -области ФЭП фотогенерированных носителей тока.

Причинами оптических потерь в преобразователях лазерного излучения являются отражение части излучения от поверхности ФЭП и затенение контактной сеткой. Снижение коэффициента отражения  $R$  достигается нанесением на поверхность ФЭП просветляющих покрытий в виде тонких пленок, обеспечивающих интерференцию и взаимное гашение световых волн, отраженных от поверхности пленки и от границы пленка — полупроводник. Интегральный коэффициент отражения, таким образом, может быть уменьшен от  $R \approx 30\%$  для непросветленной поверхности до  $R < 1\%$  при использовании многослойных просветляющих покрытий.

Вторую часть оптических потерь в ФЭП составляют потери на затенение светочувствитель-

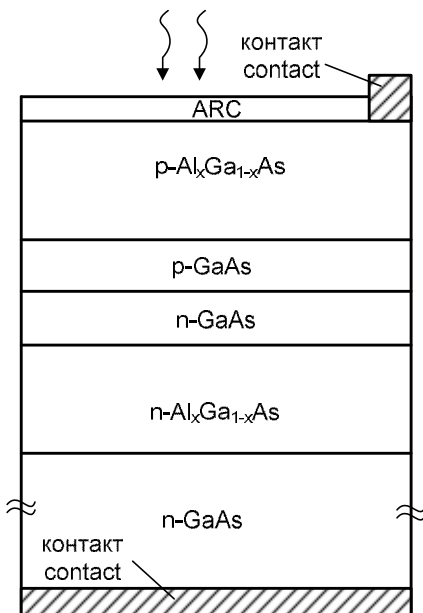
ной поверхности электрическим контактом к освещаемой области  $p$ - $n$ -перехода. Для снижения омических потерь контакт обычно выполняется в виде металлической сетки с шагом от 100–200 мкм (для преобразования лазерного излучения средней мощности —  $1\text{--}10 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ) до 50 мкм (для преобразования более мощного лазерного излучения). При этом потери на затенение могут составлять от нескольких процентов до 10%.

Основным способом повышения фоточувствительности является увеличение времени жизни генерированных электронов (дырок), приводящее к увеличению КПД, что достигается использованием материала более высокого качества.

Поверхностную рекомбинацию на тыльной стороне фотоактивной области ФЭП уменьшают при создании потенциального барьера за счет создания тыльного широкозонного барье-

ра (рис. 3). Для уменьшения рекомбинационных потерь и эффективного собирания носителей тока, отраженных от тыльного потенциального барьера, уменьшают толщину базовой области. Однако при этом увеличивается прозрачность структуры для излучения с  $h\nu \approx E_g$ .

Эффективным путем снижения потерь для этого излучения является использование встроенного брэгговского зеркала, состоящего из периодической структуры с чередованием слоев GaAs и AlAs, имеющих различную оптическую плотность. Недостатком брэгговского зеркала является обеспечение высокого коэффициента отражения только внутри телесного угла с раскрытием  $\pm 20$  угловых градусов, что не позволяет обеспечить отражение рекомбинационного излучения, генерированного неразделенными  $p$ - $n$ -переходом электронно-дырочными парами. Более эффективное отражение и рециркуляцию фотонов обеспечивает тыльный Ag-отражатель, встроенный в структуру. ФЭП такого типа с Ag-отражателем будут рассмотрены в последнем разделе статьи.



**Рис. 3.** Гетероструктура фотоэлектрического преобразователя мощного лазерного излучения

И с т о ч н и к: составлено авторами В.М. Андреевым, Н.А. Калюжным

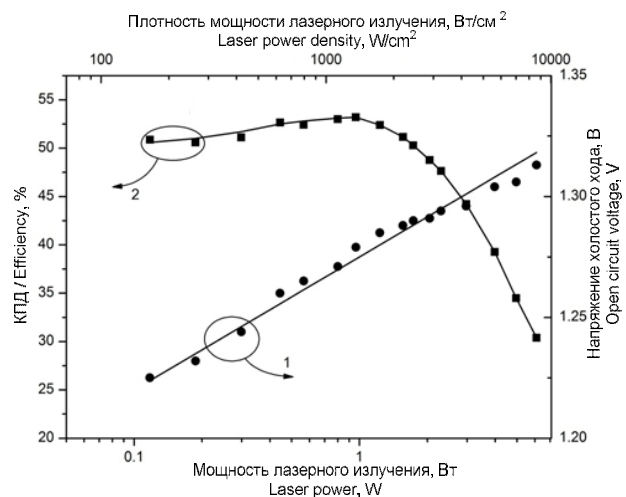
**Figure 3.** Heterostructure of photovoltaic laser power converter  
S o u r c e: made by the authors V.M. Andreev, N.A. Kalyuzhnyy

## 2. Фотоэлектрические преобразователи мощного лазерного излучения на основе AlGaAs/GaAs структур

На рис. 3 показана AlGaAs/GaAs структура фотоэлектрических преобразователей мощного лазерного излучения ( $\lambda = 800\text{--}870$  нм), получаемых методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках n-GaAs.

Первый слой  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,2\text{--}0,3$ ) в структуре, показанной на рис. 3, выполняет функцию потенциального барьера для носителей тока, генерированных в фотоактивной области, включающей слои n-GaAs и p-GaAs, суммарной толщиной порядка 2 мкм.

Фронтальный сильно легированный слой  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,15\text{--}0,2$ ) выполняет функцию широкозонного «окна», прозрачного для излучения с длиной волны 820–870 нм. Этот слой выращивается с повышенным уровнем легирования ( $10^{19}$  см<sup>-3</sup>) для снижения сопротивления растекания для носителей тока, генерированных между токоотводящими полосковыми контактами.



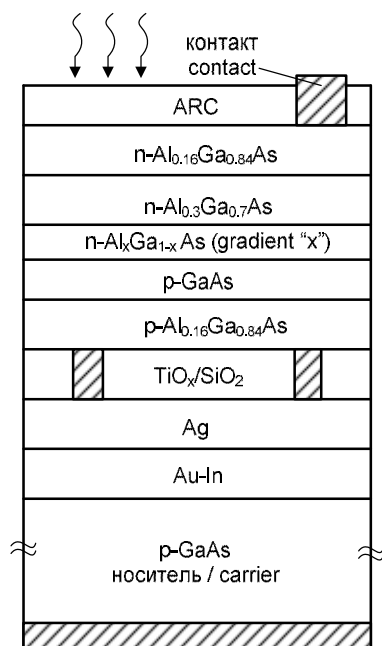
**Рис. 4.** Зависимость напряжения холостого хода (кривая 1) и КПД (2) от мощности импульсного лазерного излучения (нижняя шкала абсцисс) и от плотности мощности (верхняя шкала) AlGaAs/GaAs фотопреобразователя

И с т о ч н и к: составлено авторами М.В. Нахимовичем, М.З. Шварцем

**Figure 4.** Plots of open-circuit voltage (1) and conversion efficiency (2) vs. laser pulse power (bottom scale) and power density (top scale) for AlGaAs/GaAs photovoltaic converter

S o u r c e: made by the authors M.V. Nakhimovitch, M.Z. Shvarts

На рис. 4 приведены основные характеристики ФЭП лазерного излучения с длиной волны 840 нм, оптимизированного для работы при повышенной мощности (более  $10^2$  Вт/см<sup>2</sup>) излучения [20]. Гетероструктура ФЭП подобна изображенной на рис. 3 при ширине контактных полос 6 мкм и шаге 50 мкм, что обеспечивает минимизацию омических потерь в ФЭП при высокой мощности лазерного излучения. Измерения проводились под импульсным лазерным облучением с длительностью импульсов 300 нс. При максимальной мощности облучения ( $\sim 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>) достигнуто значение напряжения холостого хода, равное 1,32 В. Максимальная величина КПД = 54 % получена при мощности лазерного излучения 1,4 кВт/см<sup>2</sup>.



**Рис. 5.** Гетероструктура высокоэффективного фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения с  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  слоем в области пространственного заряда  $p-n$ -перехода и с тыльным Ag-отражателем

И с т о ч н и к: составлено авторами В.М. Андреевым, А.В. Малевской

**Figure 5.** Photovoltaic converter heterostructure with  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  in space charge of the  $p-n$ -junction and with rear Ag-reflector

S o u r c e: made by the authors V.M. Andreev, A.V. Malevskaya

На рис. 5 представлена разработанная гетероструктура фотоэлектрического преобразователя, основными особенностями которой являются встроенное Ag-зеркало и выполнение фотоак-

тивной области на основе  $n-Al_{0.35}Ga_{0.65}As/p-GaAs$  гетероперехода со встроенным в гетеропереход слоем  $Al_xGa_{1-x}As$ , включая плавный гетеропереход с линейным увеличением содержания AlAs от  $x = 0$  вблизи слоя  $p-GaAs$  до  $x = 0,3$  вблизи слоя  $n-Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ .

### 3. Высокоэффективные фотоэлектрические преобразователи на основе гетероструктур с тыльным Ag-отражателем

Смещение широкозонного материала в область пространственного заряда  $p-n$ -гетероперехода уменьшает темновой ток насыщения, что обеспечивает увеличение напряжения в точке оптимальной нагрузки и рост КПД. Увеличение КПД получено также благодаря формированию в структуре тыльного Ag-отражателя и возврата в активную область рекомбинационного излучения, генерированного при рекомбинации части электронно-дырочных пар, не разделенных полем  $p-n$ -перехода. Это рекомбинационное излучение является изотропным, распространяющимся от  $p-n$ -перехода равновероятно во всех направлениях.

Для эффективного внутреннего отражения и преобразования вторичного рекомбинационного излучения была разработана «инверсная» эпитаксиальная структура с удаляемой подложкой и технология комбинированного отражателя в виде слоя серебра, нанесенного на промежуточный слой диэлектрика ( $TiO_x + SiO_2$ ). Такое зеркало обеспечивает двухстадийное отражение: полное внутреннее отражение «латеральных» лучей, падающих на границу полупроводник/диэлектрик под углами, превосходящими угол полного внутреннего отражения, и отражение лучей, падающих на Ag-зеркало под углами, меньшими угла полного отражения от границы полупроводник/диэлектрик. Процессы рециркуляции и перепоглощения фотонов, происходящие благодаря тыльному отражателю, обеспечивают увеличение эффективного времени жизни генерированных носителей тока, увеличение фототока и генерируемого напряжения ФЭП.

Постростовая технология изготовления чипов ФЭП (см. рис. 5) включала встраивание в структуру Ag-отражателя путем переноса гетероструктуры на пластину-носитель  $p-GaAs$ . Сначала на фронтальной поверхности гетероструктуры к слою  $p-Al_{0.16}Ga_{0.84}As$  изготавливались точечные металлические контакты с затенением 2 % по-

верхности. Затем в местах, свободных от точечных контактов, наносилось диэлектрическое покрытие  $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ , обеспечивающее планаризацию поверхности и защиту напыляемого на  $\text{SiO}_2$  слоя серебра от взаимодействия (спекания) со слоем  $p\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$  и для увеличения коэффициента отражения тыльного зеркала за счет использования эффекта полного внутреннего отражения от границы полупроводник/диэлектрик.

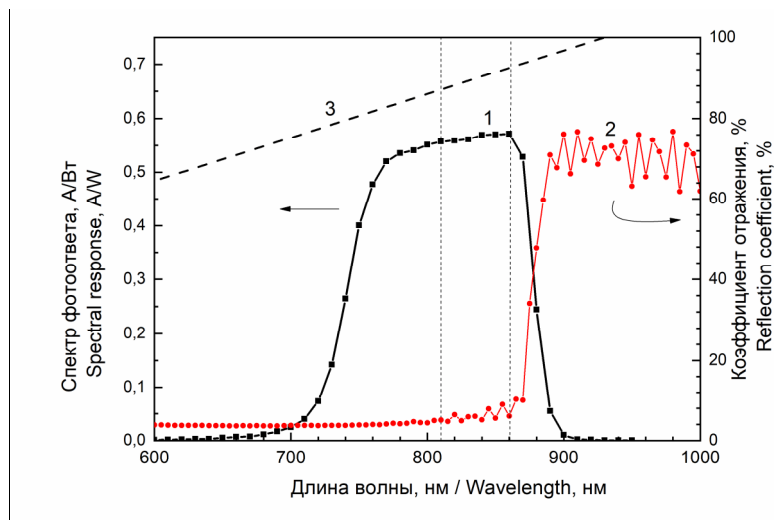
Перенос гетероструктуры на пластину-носитель  $p\text{-GaAs}$  осуществлялся путем сплавления с использованием электропроводящего сплава  $\text{Au-In}$ . Далее осуществлялось удаление ростовой подложки  $n\text{-GaAs}$  до «жертвенного» слоя  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  и травливание «жертвенного» слоя. Далее осуществлялось «переворачивание» гетероструктуры, изготавливались фронтальные полосковые контакты к  $n\text{-Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$  (ширина полос 6 мкм, шаг 50 мкм), наносилось антиотражающее покрытие (ARC) и осуществлялось формирование чипа ФЭП с фоточувствительной областью диаметром 500 мкм с контактными полосами шириной 6 мкм и с шагом 50 мкм.

На рис. 6 (кривая 1) приведена спектральная зависимость внешней фоточувствительности ( $SR_{ext}$ ) и коэффициента отражения (кривая 2) от поверхности ФЭП с антиотражающим покрытием  $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ . На спектрах отражения в спек-

тральном диапазоне более 850 нм наблюдаются пики фоточувствительности и отражения вследствие интерференции в тонких слоях диэлектриков ( $\text{TiO}_x$  и  $\text{SiO}_2$ ).

На рис. 7 приведены зависимости параметров разработанных ФЭП от плотности мощности импульсного (300 мкс) лазерного излучения. Значение фактора заполнения ВАХ составляют:  $FF = 87\%$  при  $P = 60\text{--}170\text{ Вт/см}^2$  и  $FF = 79\%$  при  $P = 550\text{ Вт/см}^2$ . Напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ ) в ФЭП увеличивается от  $V_{oc} = 1,26\text{ В}$  при  $P = 170\text{ Вт/см}^2$  и до  $V_{oc} = 1,28\text{ В}$  при  $P = 550\text{ Вт/см}^2$ . Полученные значения напряжения холостого хода превышают значения  $V_{oc}$ , полученные в ФЭП на основе структур с гомо  $p\text{-}n$ -переходом в  $\text{GaAs}$  без тыльного отражателя. Существенное увеличение  $V_{oc}$  в разработанных ФЭП получено благодаря включению широкозонного слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в область объемного заряда гетероперехода  $p\text{-GaAs}/n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и благодаря внутреннему переотражению (рециклированию) «подзонных» фотонов от встроенного тыльного отражателя.

Максимальное значение КПД  $> 60\%$  достигнуто в изготовленных ФЭП при длине волны лазерного излучения 860 нм в диапазоне плотности мощности 50–400  $\text{Вт/см}^2$  (рис. 7, кривая 1). При максимальной мощности  $P = 550\text{ Вт/см}^2$  получен КПД = 57,8 %.



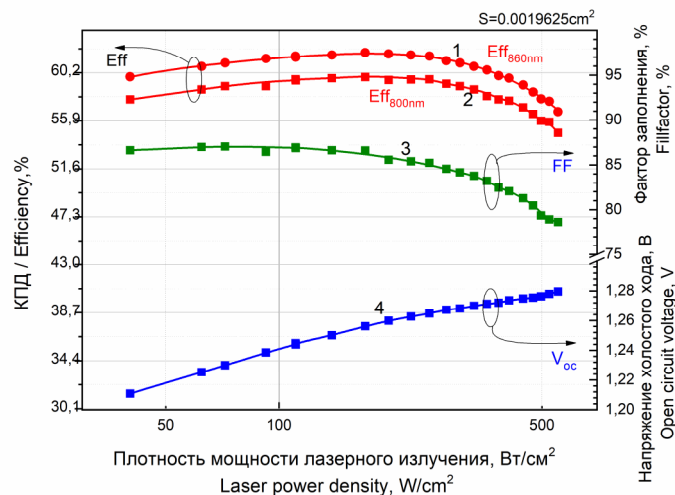
**Рис. 6.** Спектры фотоответа (1), коэффициента отражения (2) фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения с тыльным  $\text{Ag}$ -отражателем и спектральная зависимость предельной теоретической фоточувствительности (3)

Источники: составлено авторами М.В. Нахимовичем, М.З. Шварцем

**Figure 6.** Spectral photoresponse (1), reflection coefficient of photovoltaic laser power converter with rear  $\text{Ag}$ -reflector (2), and theoretical maximum of spectral photoresponse (3)

Source: made by the authors M.V. Nakhimovitch, M.Z. Shvarts





**Рис. 7.** Зависимости КПД (Eff) фотопреобразователя лазерного излучения при  $\lambda = 860$  нм (кривая 1) и при  $\lambda = 800$  нм (2), фактора заполнения (FF) (3) нагрузочной вольтамперной характеристики и напряжения холостого хода ( $V_{oc}$ ) (4) от плотности мощности лазерного излучения  
И с т о ч н и к: составлено авторами М.В. Нахимовичем, М.З. Шварцем

**Figure 7.** Photovoltaic converter efficiency (Eff) of laser radiation at  $\lambda = 860$  nm (curve 1) and  $\lambda = 800$  nm (2), fillfactor (FF) (3) of voltage-current characteristics and open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) (4) depending of the value of laser power density

S o u r c e: made by the authors M.V. Nakhimovitch, M.Z. Shvarts

## Заклучение

Разработаны фотоэлектрические преобразователи мощного (более 100 Вт/см<sup>2</sup>) лазерного излучения с длиной волны 800-860 нм. ФЭП изготовлены на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии. ФЭП включают узкозонную активную область в GaAs, окруженную широкозонными фронтальным и тыльным слоями. Для повышения генерируемого напряжения активная область была выполнена на основе гетероперехода Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As/p-GaAs со встроенным «градиентным» слоем Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, сглаживающим потенциальные барьеры. В структуру ФЭП добавлен тыльный Ag-отражатель, обеспечивающий отражение фотонов в активную область ФЭП и снижение рекомбинационных потерь.

Максимальный КПД > 60% преобразования лазерного излучения ( $\lambda = 860$  нм) достигнут в диапазоне плотности мощности лазерного излучения 50–400 Вт/см<sup>2</sup>. Разработанные ФЭП, обеспечивающие высокоэффективное преобразование мощного лазерного излучения, могут найти широкое применение в лазерных системах передачи энергии по оптоволокну и по открытому оптическому каналу на Земле и в космосе.

## Список литературы / References

1. Andreev VM, Grilikhes VA, Rumyantsev VD. *Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight* (monograph). John Wiley Publ.; 1997.
2. Alferov ZhI, Andreev VM, Rumyantsev VD. III–V heterostructures in photovoltaics. *Concentrator Photovoltaics. Springer Series in Optical Sciences*. 2007; 130:25–50. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-68798-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68798-6_2)
3. Alferov ZhI, Andreev VM, Rumyantsev VD. III–V solar cells and concentrator arrays. *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics, Springer Series in Optical Sciences*. 2008;140:101–141. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-79359-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79359-5_8)
4. Alferov ZhI, Andreev VM, Shvarts MZ. III–V Solar Cells and Concentrator Arrays. *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. Recent Developments. Springer Series in Optical Sciences*. 2020;140:133–174. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22864-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22864-4_8)
5. Iles PA. Non-solar photovoltaic cells. *IEEE Conference on Photovoltaic Specialists, Kissimmee, FL, USA*, 1990;(1):420–425. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1990.111659>
6. Olsen LC, Huber DA, Dunham G, Addis FW, Anheier N. High efficiency monochromatic GaAs solar cells. *Proceedings of 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, NV, USA*. 1991;(1):419–424. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1991.169250>
7. Howell JT, O’Neill MJ, Fork RL. Advanced receiver/converter experiments for laser wireless power

transmission. In: *Proc. 5th Wireless Power Transmission Conf. together with 4th Intern. Conf. on Solar Power from Space*. Granada, Spain, 2004. p. 187–194.

8. Schubert J, Oliva E, Dimroth F, Guter W, Loeckenhoff R, Bett AW. High-voltage GaAs photovoltaic laser power converters. *IEEE Transactions of electron devices*. 2009;56(2):170–175.

9. Helmers H, Bett AW. Photovoltaic laser power converters for wireless optical power supply of sensor systems. *IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/WiSEE.2016.7877321>

10. Jarvis S.D., Mukherjee J., Perren M., Sweeney S.J. Development and characterisation of laser power converters for optical power transfer applications. *IET Optoelectron*. 2014;8(2):64. <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2013.0066>

11. Kimovec R, Helmers H, Bett AW, Topic M. Comprehensive electrical loss analysis of monolithic interconnected multi-segment laser power converters. *Progress in Photovoltaics Research and Application*. 2019;27(3):199–209. <https://doi.org/10.1002/pip.3075>

12. Mukherjee J, Jarvis S, Perren M, Sweeney SJ. Efficiency limits of laser power converters for optical power transfer applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013;46(26):264006. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/26/264006>

13. Andreev V, Khvostikov V, Kalinovsky V, Lantratov V, Grilikhes V, Rummyantsev V, Shvarts M, Fokanov V, Pavlov A. High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power beaming. *Proc. 3rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion (Osaka)*. 2003;3P-B5-33.

14. Klinger S, Vogel W, Berroth M, Kaschel M. Ge on Si p-i-n photodetectors with 40 GHz bandwidth. *5th IEEE International Conference on Group IV Photonics, Sorrento, Italy*. 2008:188–190. <https://doi.org/10.1109/GROUP4.2008.4638140>

15. Piels M, Bowers JE. 40 GHz Si/Ge uni-traveling carrier waveguide photodiode. *Lightwave Technology*. 2014;32(20):3502–3508. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2310780>

16. Kalyuzhnyy NA, Emelyanov VM, Evstropov VV, Mintairov SA, Mintairov MA, Nahimovich MV, Salii RA,

Shvarts MZ. Optimization of photoelectric parameters of InGaAs metamorphic laser ( $\lambda = 1064$  nm) power converters with over 50 % efficiency. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2020;217:110710. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110710>

17. Kalyuzhnyy NA, Emelyanov VM, Mintairov SA, Nahimovich MV, Salii RA, Shvarts MZ. InGaAs metamorphic laser power converters with distributed Bragg reflector for wavelength range  $\lambda = 1-1.1$   $\mu\text{m}$ . *AIP Conference Proceedings*. 2020;2298(1):030001. <https://doi.org/10.1063/5.0032903>

18. Kim Y, Shin H-B, Lee W-H, Jung SH, Kim CZ, Kim H, Lee YT, Kang HK. 1080 nm InGaAs laser power converters grown by MOCVD using InAlGaAs metamorphic buffer layers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019;200:109984. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109984>

19. Oliva E, Dimroth E, Bett AW. GaAs converters for high power densities of laser illumination. *Progress in Photovoltaics. Research and Applications*. 2008;16:289–295. <https://doi.org/10.1002/pip.811>

20. Panchak AN, Pokrovskiy PV, Malevskiy DA, Larionov VR, Shvarts MZ. High-Efficiency Conversion of High-Power-Density Laser Radiation. *Technical Physics Letters*. 2019;45(1):24–26. <https://doi.org/10.1134/S1063785019010310>

21. Khvostikov VP, Kalyuzhnyy NA, Mintairov SA, Sorokina SV, Potapovich NS, Emelyanov VM, Timoshina NK, Andreev VM. Photovoltaic Laser-Power Converter Based on AlGaAs/GaAs Heterostructures. *Semiconductors*. 2016;50(9):1220–1224. <https://doi.org/10.1134/S1063782616090128>

22. Helmers H, Lopez E, Höhn O, Lackner D, Schön J, Schauerte M, Schachtner M, Dimroth F, Bett AW. 68.9 % Efficient GaAs-Based Photonic Power Conversion Enabled by Photon Recycling and Optical Resonance. *Phys. Status Solidi RRL*. 2021;2100113. <https://doi.org/10.1002/pssr.202100113>

23. Beattie MN, Helmers H, Forcade GP, Valdivia CE, Höhn O, Hinzer K. InP- and GaAs-Based Photonic Power Converters Under O-Band Laser Illumination: Performance Analysis and Comparison. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2023;13(1):113–121.

## Сведения об авторах

**Андреев Вячеслав Михайлович**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник лаборатории фотоэлектрических преобразователей, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 8199-5248; ORCID: 0000-0001-9927-3719; E-mail: vmandreev@mail.ioffe.ru

**Калюжный Николай Александрович**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией наногетероструктурных излучателей и фотоприемников, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 2106-9180; ORCID: 0000-0001-8443-4663; E-mail: Nickk@mail.ioffe.ru

**Малевская Александра Вячеславовна**, научный сотрудник лаборатории наногетероструктурных излучателей и фотоприемников, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия; AuthorID: 175341; ORCID: 0000-0003-4018-6631; E-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

**Нахимович Мария Валерьевна**, научный сотрудник лаборатории фотоэлектрических преобразователей, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0005-4371-1077; E-mail: NMar@mail.ioffe.ru

**Шварц Максим Зиновьевич**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией фотоэлектрических преобразователей, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 6900-3137; ORCID: 0000-0002-2230-7770; E-mail: shvarts@scell.ioffe.ru

#### About the authors

**Viacheslav M. Andreev**, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of Photovoltaics Laboratory, Ioffe Institute, Petersburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 8199-5248; ORCID: 0000-0001-9927-3719; E-mail: vmandreev@mail.ioffe.ru

**Nikolay A. Kalyuzhnyy**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Nanoheterostructural Emitters and photodetectors Laboratory, Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 2106-9180; ORCID: 0000-0001-8443-4663; E-mail: Nickk@mail.ioffe.ru

**Alexandra V. Malevskaya**, researcher of Nanoheterostructural emitters and photodetectors laboratory, Ioffe Institute, 26 Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, 194021, Russia; AuthorID: 175341; ORCID: 0000-0003-4018-6631; E-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

**Mariia V. Nakhimovitch**, Researcher of Photovoltaics Laboratory, Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0005-4371-1077; E-mail: NMar@mail.ioffe.ru

**Maxim Z. Shvarts**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Photovoltaics Laboratory, Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 6900-3137; ORCID: 0000-0002-2230-7770; E-mail: shvarts@scell.ioffe.ru