

Фотоэлектрический преобразователь лазерного излучения на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs

© В.П. Хвостиков, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, В.М. Емельянов, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев

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

E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

(Получена 2 февраля 2016 г. Принята к печати 9 февраля 2016 г.)

На основе однопереходных структур AlGaAs/GaAs, полученных методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений, разработаны и изготовлены преобразователи лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 809$ нм. С применением математического моделирования проведена оптимизация параметров фотоэлементной структуры — оптического „окна“ и эмиттера. Изготовлены и исследованы преобразователи площадью $S = 10.2, 12.2$ мм² и 4 см². Для фотоэлементов с $S = 10.2$ мм² значения монохроматической эффективности (η) составили 60.0% при плотности тока 5.9 А/см². Собран фотоэлектрический модуль с рабочим напряжением 4 В ($\eta = 56.3\%$ при 0.34 А/см²).

1. Введение

В настоящее время активно развиваются новые технологии, связанные с практическим использованием лазерного излучения, распространяющегося в атмосфере, космическом пространстве [1–3], а также в оптоволокне [4,5], с целью получения электроэнергии и передачи информационных данных. К таким направлениям относятся дистанционное энергопитание космических аппаратов и передача энергии из космоса на Землю посредством лазерного луча; энергоснабжение в наземных условиях в качестве альтернативы традиционным кабельным линиям электропередачи; создание быстродействующих фотодетекторов [6]; разработка малогабаритной электроники бытового и медицинского назначения с использованием беспроводной зарядки элементов питания, например, для имплантируемых кардиостимуляторов и других медицинских автономных аппаратов поддержания жизнедеятельности организма. Работы в этих областях активно ведутся за рубежом.

Высокая практическая значимость решаемых задач требует повышения надежности, безопасности и эффективности как указанных систем в целом, так и их отдельных компонентов, в том числе увеличения КПД лазера и фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения при максимально возможном согласовании их рабочей длины волны.

Мощные полупроводниковые лазеры с длиной волны излучения 808–809 нм широко применяются в системах накачки твердотельных лазеров и волоконных усилителей. Теоретический предел эффективности фотоэлектрического преобразования для монохроматического излучения значительно выше, чем для солнечного света, характеризующегося достаточно большим спектральным диапазоном. При засветке излучением с длиной волны $\lambda = 809$ нм максимальные расчетные значения КПД приемника на основе AlGaAs/GaAs достигают $\sim 80\%$ [7–10]. Практически достижимый предел

эффективности для заданных условий обеспечивается на уровне 65% [10].

Данная работа посвящена оптимизации структур и исследованию конструктивных особенностей фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения ($\lambda = 809$ нм) на основе AlGaAs/GaAs, а также созданию фотоэлектрического модуля с рабочим напряжением 4 В.

2. Оптимизация структуры преобразователя лазерного излучения

Выращивание гетероструктур AlGaAs/GaAs осуществлялось методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на установке AIX200/4. Технологические процессы проводились в условиях пониженного давления газа в реакторе (100 мбар), что способствовало снижению вероятности протекания побочных химических реакций в газовой фазе и обеспечивало высокую однородность толщин эпитаксиальных слоев. Температура роста задавалась равной 700°C, а скорость роста составляла 3 мкм/ч. В качестве источников атомов галлия и алюминия использовались триметилгаллий (TMGa) и триметилалюминий (TMAI) при температурах на испарителях –10 и 17°C, соответственно, и давлении 1000 мбар. Источником атомов мышьяка служил арсин (AsH₃). В качестве источников легирующей примеси применялись диэтилцинк (DEZn) и 5%-я смесь силана (SiH₄) с водородом.

Структура сильноточного фотопреобразователя лазерного излучения (рис. 1) включала фотоактивный $p-n$ -переход в GaAs, ограниченный со стороны базы слоем Al_{0.3}Ga_{0.7}As. Осаждение такого твердого раствора с шириной запрещенной зоны $E_g = 1.8$ эВ создает тыльный потенциальный барьер для носителей заряда, образованных при поглощении фотонов вдали от $p-n$ -перехода, и повышает эффективность их собирания

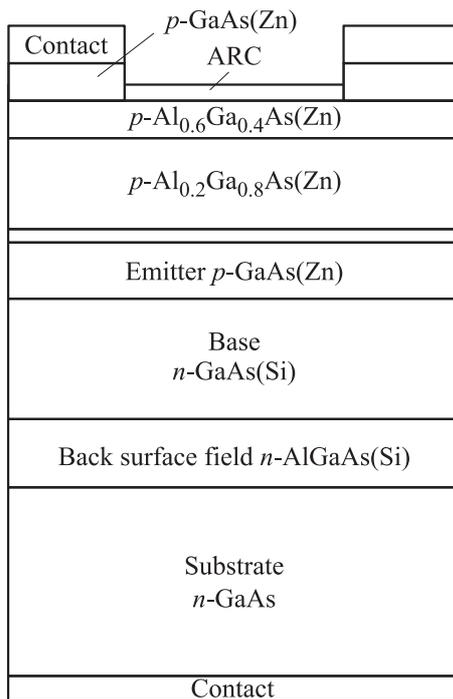


Рис. 1. Структура преобразователя лазерного излучения.

в базе *n*-GaAs. В качестве подложки использовались пластины *n*-GaAs, разориентированные на 6° в направлении [111]A.

Со стороны эмиттера выращивался слой широкозонного оптического „окна“ $Al_xGa_{1-x}As$. Твердый раствор создает барьер для генерированных в узкозонной области дырок, снижая таким образом скорость поверхностной рекомбинации, а также способствует растеканию носителей заряда. В отличие от солнечных элементов, для преобразователей лазерного излучения нет необходимости осаждения тонкого слоя „окна“ с высоким содержанием алюминия, повышающего фоточувствительность в коротковолновой области спектра. По этой причине содержание Al было уменьшено до $x = 0.2$. Толщина (d) и уровень легирования „окна“ выбирались из соображений снижения омических потерь за счет уменьшения сопротивления растекания слоя.

Омические потери определяют положение максимума КПД, причем они возрастают пропорционально квадрату величины светового потока, вследствие чего особенно существенны в сильноточных режимах эксплуатации преобразователя лазерного излучения. Сопротивление растекания слоя является характеристической величиной, определяющей величину омических потерь в элементе при протекании в слое латеральных токов.

Оптимизация параметров „окна“ и эмиттера проводилась на основе математического моделирования. Использована разработанная математическая модель [11–13], основанная на расчете поля световой волны в структуре фотопреобразователя методом матриц Абелеса, реше-

нии диффузионно-дрейфовых уравнений методом малого параметра и построении трехмерной распределенной эквивалентной схемы. Были рассчитаны зависимости нормированной на фототок мощности при различных значениях последовательного сопротивления (R_s), обусловленного растеканием в слое широкозонного „окна“ (рис. 2).

Как следует из рисунка, последовательное сопротивление не приводит к значимому снижению мощности для диапазона значений фототока 4–5 А/см², если оно не превышает $R_s = 0.005 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Выбранные при изготовлении структуры толщина и уровень легирования эмиттера *p*-GaAs ($d = 350 \text{ нм}$, концентрация дырок $p = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), параметры широкозонного „окна“ $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ ($d = 1000 \text{ нм}$, $p = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$), а также

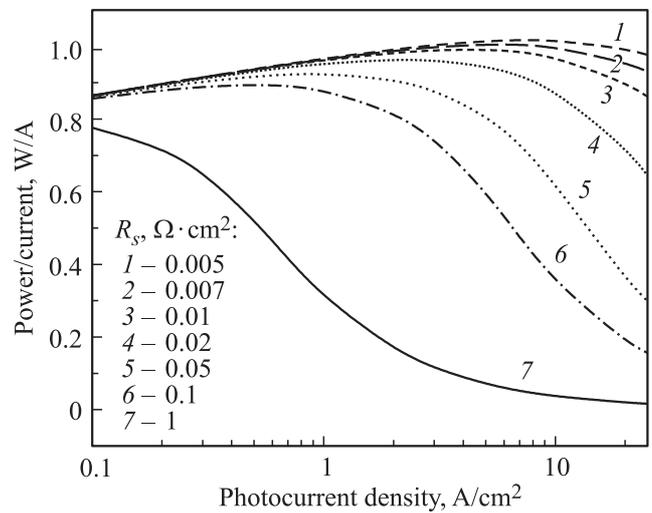


Рис. 2. Зависимости нормированной мощности от величины фототока при различных значениях последовательного сопротивления в диапазоне, характерном для преобразователей лазерного излучения с $\lambda = 809 \text{ нм}$.

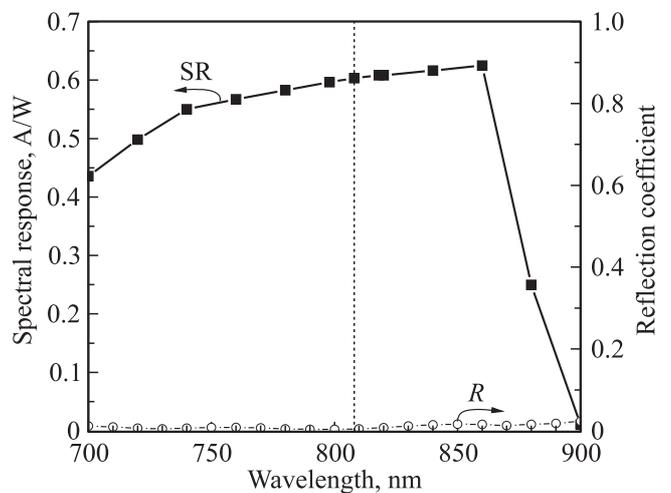


Рис. 3. Спектральная чувствительность (SR) и отражение (R) преобразователя лазерного излучения с $\lambda = 809 \text{ нм}$.

конструкция контактной сетки (шаг 100 мкм) должны были обеспечивать последовательное сопротивление структуры на уровне $R_s = 0.001-0.002 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

На поверхности „окна“ выращивался широкозонный твердый раствор $p\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$, химические свойства которого позволяли выполнять функцию стоп-слоя на этапе постростовой обработки при травлении контактного слоя $p^+\text{-GaAs}$ ($d = 300 \text{ нм}$). Толщина стоп-слоя достаточно мала (20 нм), чтобы не оказывать критического влияния на отражение в фотоактивной области преобразователя (рис. 3). В качестве двухслойного просветляющего покрытия использовался $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (коэффициент отражения $R_{|\lambda=809 \text{ нм}} = 0.0046$). Фронтальный контакт имел сложную структуру и наносился с использованием методов фотолитографии, напыления слоев AgMg-Ni-Au и электролитического осаждения металла (Au или Ag, см. далее). Утолщение контактов необходимо для уменьшения их последовательного сопротивления, а также для последующего монтажа преобразователей в модуль.

3. Параметры преобразователей лазерного излучения разной площади и различного назначения

Были изготовлены и протестированы преобразователи разной площади (рис. 3–6). На лучших образцах ($S = 10.2 \text{ мм}^2$) при измерении под Хе-лампой достигнуты следующие параметры: напряжение холостого хода $V_{oc} = 1.19 \text{ В}$, фактор заполнения вольт-амперной характеристики $FF = 83.9\%$, квантовая эффективность $\eta = 60.0\%$ при плотности тока 5.9 А/см^2 (рис. 4).

С увеличением плотности излучения, падающего на фотоэлемент, важнейшее значение приобретает задача оптимизации затенения поверхности контактами и снижения переходного сопротивления. Преобразователи

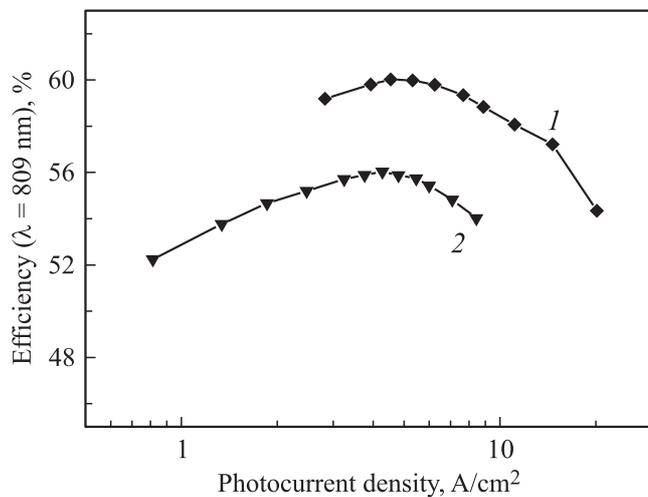


Рис. 4. Монохроматическая эффективность ($\lambda = 809 \text{ нм}$) преобразователя лазерного излучения. $S = 10.2$ (1), 12.2 мм^2 (2).

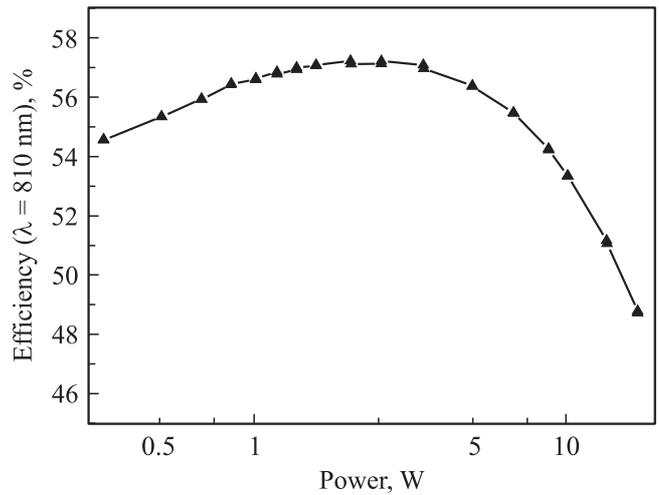


Рис. 5. Монохроматическая эффективность ($\lambda = 809 \text{ нм}$) преобразователя площадью $S = 4 \text{ см}^2$ в зависимости от мощности лазерного излучения.

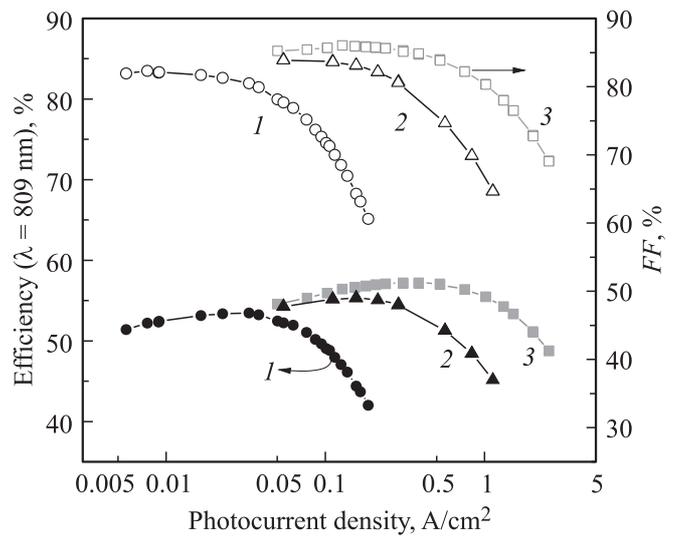


Рис. 6. Зависимость эффективности η и FF от плотности фототока для преобразователей ($S = 4 \text{ см}^2$) с периферическим (1) и центральным (2, 3) расположением токосборной шины. Контакты: 1, 2 — золотосодержащие и 3 — серебросодержащие.

лазерного излучения площадью $S = 4 \text{ см}^2$ (рис. 5, 6) отличались не только геометрией контактной сетки, но и типом фронтальных контактов. Периферическое расположение токосборной ($\sim 200 \text{ мкм}$) шины приводило к падению эффективности при плотностях фототока $> 0.03 \text{ А/см}^2$ (рис. 6, кривая 1). Для снижения омических потерь был разработан фотошаблон с центральной широкой шиной (500 мкм). Изменение параметров фотоэлементов при смене топологии контактной сетки показано на рис. 6 (кривая 2). Смещение максимума η за счет увеличения толщины лицевых контактов (до 4 мкм вместо 2) и замены электролитического осаждения золо-

та на серебро иллюстрирует кривая 3 на рис. 6. На преобразователях данного типа при плотности фототока 0.2–0.5 А/см² была достигнута эффективность > 57%.

4. Модуль и его параметры

Рабочее напряжение преобразователя определяется свойствами полупроводникового материала и для AlGaAs/GaAs составляет ~ 1 В. Для практического использования (например, для зарядки аккумуляторных батарей) требуется напряжение 4–5 В, что диктует необходимость создания модулей, проработку их конструктивного оформления и монтажа фотоэлементов в сборке.

Для экспериментальных целей был изготовлен модуль (рис. 7) из четырех последовательно соединенных элементов площадью $S = 10.2 \text{ мм}^2$. Изоляция фотоэлектрических преобразователей осуществлялась с использованием керамики на основе оксида бериллия (3) с нанесенным многокомпонентным покрытием (2). Керамика BeO обладает высокой теплопроводностью (240–260 Вт/м·К), но требует в работе соблюдения строгих мер техники безопасности из-за высокой

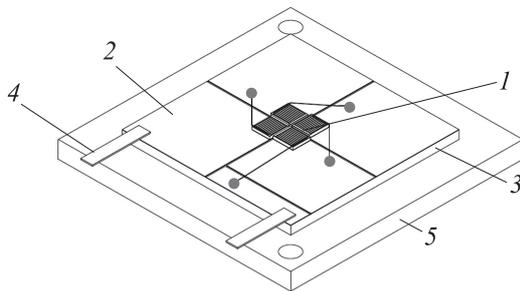


Рис. 7. Модуль из 4 фотоэлектрических преобразователей: 1 — фотоэлемент, 2 — проводящее покрытие, 3 — изоляция, 4 — контакт, 5 — основание.

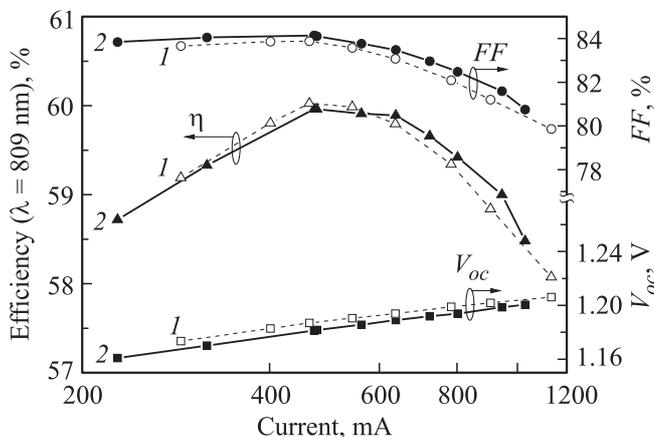


Рис. 8. Параметры фотоэлектрического преобразователя до пайки токосборных шин (1) и после пайки с использованием паяльной пасты на основе PbSnAg (2).

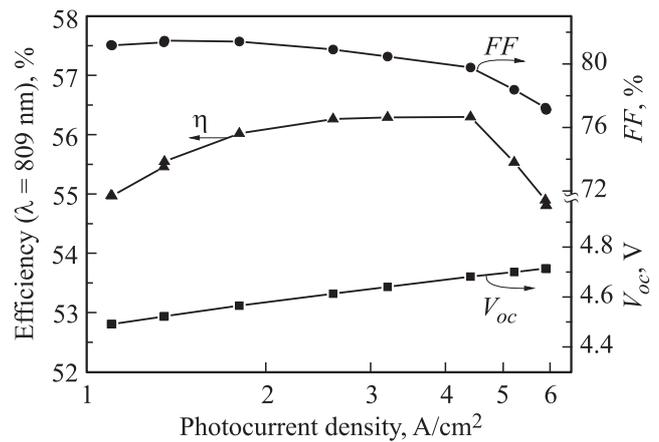


Рис. 9. Параметры модуля из 4 фотоэлектрических преобразователей.

токсичности. Для улучшения отвода тепла и обеспечения надежности конструкции керамика с проводящим рисунком и напаянными элементами устанавливалась на медное основание (5). Монтаж элементов проводился с применением паяльной пасты на основе сплава PbSnAg (температура плавления $T_m = 180^\circ\text{C}$). Температурный режим пайки должен обеспечивать надежный контакт и не ухудшать электрические параметры фотоэлектрических преобразователей, что подтверждает рис. 8. Так как при нагреве в процессе монтажа металлические поверхности могут окисляться, что приведет к снижению качества и надежности получаемых соединений, пайка проводилась в атмосфере инертного газа (аргона). Изготовленный модуль под излучением Хе-лампы имел следующие характеристики: $V_{oc} = 4.7 \text{ В}$, $FF = 80.5\%$, $\eta = 56.3\%$ при плотности фототока 0.34 А (рис. 9).

5. Заключение

Рассмотрена возможность создания высокоэффективного преобразователя лазерного излучения на основе однопереходной гетероструктуры AlGaAs/GaAs. Оптимизация толщин и уровней легирования эмиттера p-GaAs (толщина 350 нм, $p = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и широкозонного оптического окна (толщина 1000 нм, $p = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) способствовали наилучшему растеканию в указанных слоях и, следовательно, максимальному снижению последовательного сопротивления структуры, что вместе с уменьшением содержания Al в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ до ~ 20% позволило достигнуть монохроматической ($\lambda = 809 \text{ нм}$) эффективности $\eta \approx 60\%$ на единичном фотоэлектрическом преобразователе и > 55% в модуле фотоэлементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (Соглашение № 14.604.21.0089 от 27 июня 2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI60414X0089).

Список литературы

- [1] M. Smith, B. Tillotson, J. Oliver, N. Tarasenko, T. Schoelzel, H. Brandhorst. *Proc. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC)* (Austin, TX, USA, 2012) p. 002 825.
- [2] J.T. Howell, M.J. O'Neill, R.L. Fork. *Proc. 5th Wireless Transmission Conf. / 4th Int. Conf. on Solar Power from Space* (Granada, Spain, 2004) p. 187.
- [3] V. Bogushevskaya, B. Zhalnin, O. Zayats, Ya. Maslyakov, I. Matsak, A. Nikonov, Ye. Obrucheva, V. Tugaenko. *Thermal Engineering*, **59** (13), 975 (2012).
- [4] В.М. Андреев, Б.В. Егоров, А.М. Койнова, В.М. Лантратов, В.Д. Румянцев, Н.М. Сараджишвили. *ФТП*, **20** (3), 435 (1986).
- [5] R. Pena, C. Algora. *Proc. 20th EU Conf. on PV Solar Energy* (Barcelona, Spain, 2005) p. 488.
- [6] Д.Ф. Зайцев. *Нанофотоника и ее применение* (М., Актеон, 2012).
- [7] A. Luque, A. Marti. In: *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, 2003).
- [8] E. Oliva, F. Dimroth, A.W. Bett. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **16**, 289 (2008).
- [9] V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rummyantsev. *Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight* (John Wiley & Sons, Ltd., 1997).
- [10] В.М. Андреев. *Современная электроника*, **6**, 20 (2014).
- [11] V.M. Andreev, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.Kh. Timoshina. *Proc. 23rd Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Valencia, Spain, 2008) p. 375.
- [12] В.М. Емельянов, С.А. Минтаиров, С.В. Сорокина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. *ФТП*, **50** (1), 125 (2016).
- [13] V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, M.A. Mintairov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov. *Proc. 25th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. Exhibition / 5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (Valencia, Spain, 2010) p. 406.

Редактор Л.В. Шаронова

Laser power converter based on AlGaAs/GaAs heterostructure

V.P. Khvostikov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, V.M. Emelyanov, N.Kh. Timoshina, V.M. Andreev

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Laser power photovoltaic converters with a wavelength $\lambda = 809$ nm were developed and fabricated on the basis of single-junction AlGaAs/GaAs structures grown by metalloorganic vapor phase epitaxy. The parameters of a structure composed of optical „window“ and emitter were optimized by using mathematic simulations. The converters with areas of $S = 10.2, 12.2$ mm² and 4 cm² were fabricated and investigated. For photocells with $S = 10.2$ mm², the monochromatic efficiency (η) is 60% at the current density of 5.9 A/cm². A photovoltaic module with a voltage of 4 V ($\eta = 56.3\%$ at 0.34 A/cm²) was constructed.