

Фотоэлектрический преобразователь лазерного излучения для длин волн $\lambda \approx 1550$ нм на основе GaSb

© В.П. Хвостиков[†], С.В. Сорокина, Ф.Ю. Солдатенков, Н.Х. Тимошина

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

(Получена 3 декабря 2014 г. Принята к печати 15 декабря 2014 г.)

С использованием диффузии из газовой фазы в подложку *n*-GaSb получены фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения для длины волны $\lambda = 1550$ нм. Изготовлены и протестированы под Хелампой фотоэлементы площадью $S = 4, 12.2$ и 100 мм^2 . На лучших образцах с $S = 12.2 \text{ мм}^2$ при плотности тока 8 А/см^2 достигнута монохроматическая ($\lambda = 1550 \text{ нм}$) эффективность $\eta = 34.8\%$. Проведена оценка стабильности характеристик преобразователя непрерывного лазерного излучения и темпа его деградации при рабочей температуре $T \approx 120^\circ\text{С}$.

1. Введение

В настоящее время развитие полупроводниковых лазеров и технологий получения фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) лазерного излучения привело к значительному росту их КПД, что открывает широкие возможности практического использования в технологии беспроводной передачи энергии удаленному источнику, причем количество этих приложений ежегодно растет. В условиях космоса фотоэлектрический метод перспективен для дистанционного электропитания летательных аппаратов [1–4], передачи лазерного излучения с Земли на космические станции или для создания солнечных электростанций. Согласно [3], КПД системы дистанционного энергоснабжения в ближайшем будущем может составить 15–39%. Современные полупроводниковые лазеры в паре с фотоприемниками весьма перспективны и для создания качественно новых радиолокационных систем различного назначения, в том числе бортовых авиационных. В наземных условиях ФЭП лазерного излучения могут использоваться в волоконно-оптических линиях связи [5] или для подзарядки приборов бытовой электроники.

Широкий спектр применения требует практической реализации ФЭП, согласованных по длине волны λ с различными источниками лазерного излучения. Рекордные значения КПД $\eta > 56\%$ при длинах волн $\lambda = 820\text{--}850 \text{ нм}$ и плотности мощности лазерного излучения до 100 Вт/см^2 имеют ФЭП на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs [1–2, 4, 6–9]. Большой интерес представляют разработки фотоэлементов на основе GaInAsP/InP для преобразования излучения Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм [10–12]. Для дальних волоконно-оптических линий связи наибольшее распространение получили ФЭП на основе системы InGaAs/InP, перекрывающие спектральный диапазон излучения лазеров $\lambda = 1.3\text{--}1.55 \text{ мкм}$, в котором достигнуты минимальные оптические потери и минимальная дисперсия в оптических волокнах, что очень важно для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) боль-

шой протяженности [9]. Практическое применение может найти и преобразование лазерного излучения с $\lambda = 1550 \text{ нм}$ за счет возможности его передачи по оптоволокну без больших потерь. Возможный вариант эффективного приемника такого монохроматического излучения — фотоэлементы на основе антимонида галлия [9, 13].

2. Изготовление фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения методом диффузии из газовой фазы

Фотоэлектрический преобразователь лазерного излучения на основе антимонида галлия был получен диффузией цинка в подложку *n*-GaSb. Высокая спектральная чувствительность на длине волны $\lambda = 1550 \text{ нм}$ достигается при малых толщинах диффузионного эмиттера, $d < 0.3 \text{ мкм}$ (рис. 1). Поэтому, как и ранее для солнечных элементов на основе антимонида галлия [14, 15], применялся двухстадийный вариант изготовления фотоэлементной структуры — формирование

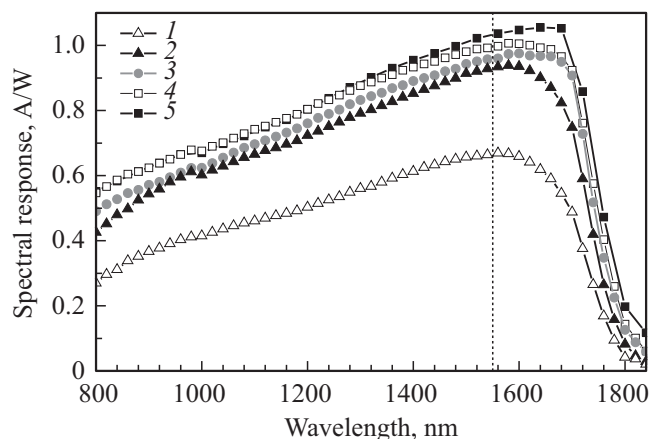


Рис. 1. Спектры фоточувствительности ФЭП лазерного излучения на основе GaSb с различной толщиной диффузионного эмиттера, мкм: 1 — 1.1, 2 — 0.9, 3 — 0.62, 4 — 0.32, 5 — 0.14.

[†] E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

тонкого p -эмиттера на фоточувствительной поверхности с последующим заглаблением диффузионного слоя до 1.0–1.5 мкм в подконтактных областях во избежание утечек p - n -перехода или проплавления слоев металлизации.

Глубина p - n -перехода определяет не только спектральную чувствительность, но и сопротивление растекания вдоль слоя, которое также является характеристикой величиной, влияющей на величину омических потерь. Омические потери в свою очередь определяют положение максимума КПД (см. далее), причем они возрастают пропорционально квадрату величины светового потока, вследствие чего особенно существенны в сильноточных режимах эксплуатации ФЭП лазерного излучения.

Исходя из баланса требований повышения спектральной чувствительности и снижения сопротивления растекания слоя оптимальную толщину p -GaSb на светочувствительной поверхности выбрали равной 0.5 мкм.

3. Параметры преобразователей лазерного излучения разной площади и назначения

Были изготовлены и протестированы фотоэлементы разной площади, $S = 4, 12.2$ и 100 мм^2 (рис. 2, 3, 4), предназначенные для преобразования излучения различной плотности. На лучших образцах ($S = 12.2 \text{ мм}^2$) при измерении под Хе-лампой достигнут КПД $\eta = 34.8\%$ при плотности тока 8 А/см^2 (рис. 3, 4).

При увеличении мощности падающего лазерного излучения на ФЭП его площадь следует уменьшать с целью снижения омических потерь. На рис. 4 показано смещение максимума КПД для фотоэлементов, преобразующих лазерное излучение различной плотности — от ~ 0.5 до $\sim 120 \text{ Вт/см}^2$.

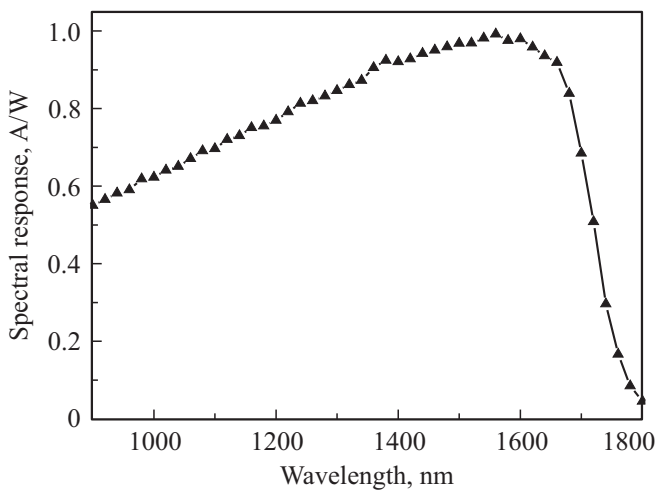


Рис. 2. Спектральная чувствительность типичного преобразователя лазерного излучения на основе GaSb.

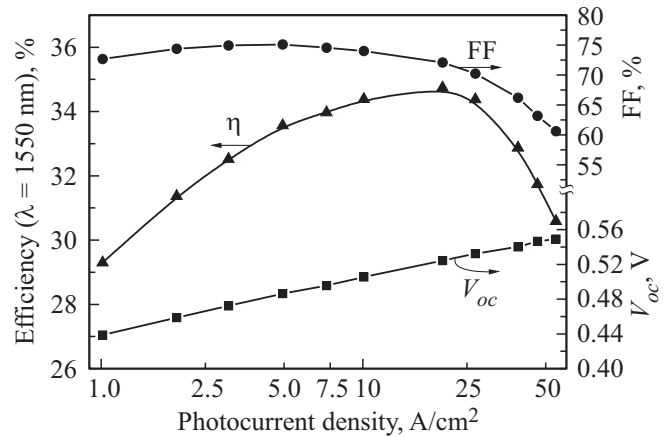


Рис. 3. Фактор заполнения вольт-амперной характеристики FF, напряжение холостого хода V_{oc} и монохроматическая эффективность η ($\lambda = 1550$ нм) преобразователя лазерного излучения с $S = 12.2 \text{ мм}^2$.

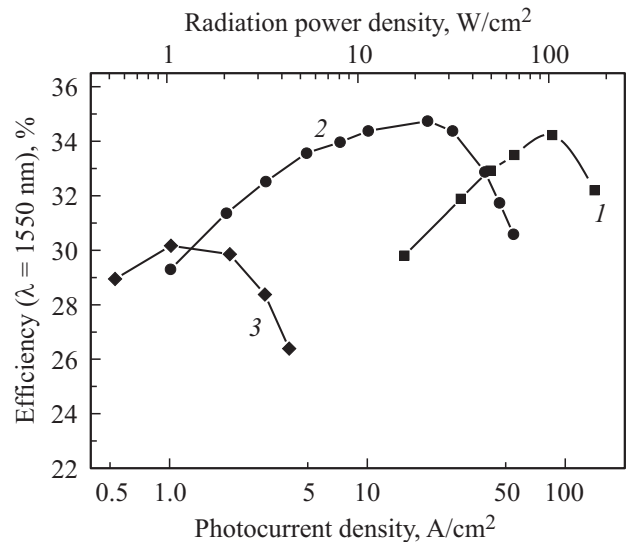


Рис. 4. Монохроматическая эффективность η ($\lambda = 1550$ нм) преобразователя лазерного излучения в зависимости от плотности фототока и энергетической освещенности. $S, \text{ мм}^2$: 1 — 4, 2 — 12.2, 3 — 100.

4. Оптимизация преобразователей лазерного излучения разной площади и назначения

С увеличением плотности падающего на фотоэлемент излучения большое значение приобретает не только задача оптимизации затенения поверхности контактами, но и задача снижения их переходного сопротивления. В связи с этим ФЭП лазерного излучения отличались не только размером элементов и конфигурацией контактной сетки, но и структурой фронтальных контактов.

Системы Ti–Pt–Au и Ti–Pt–Ag характеризуются низким контактным сопротивлением к p -GaSb [16]. Преимущество серебросодержащих композиций состоит в

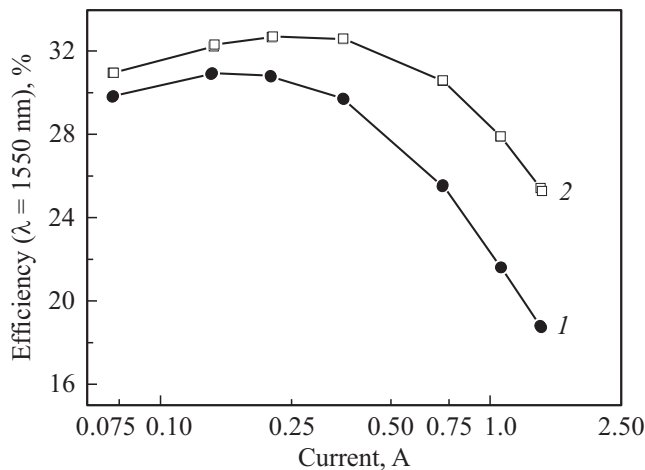


Рис. 5. Монохроматическая эффективность ($\lambda = 1550$ нм) преобразователей лазерного излучения площадью $S = 12.2$ мм² с контактными системами Ti–Pt–Au (1) и Ti–Pt–Ag (2). Суммарная толщина контакта 1.0–1.5 мкм.

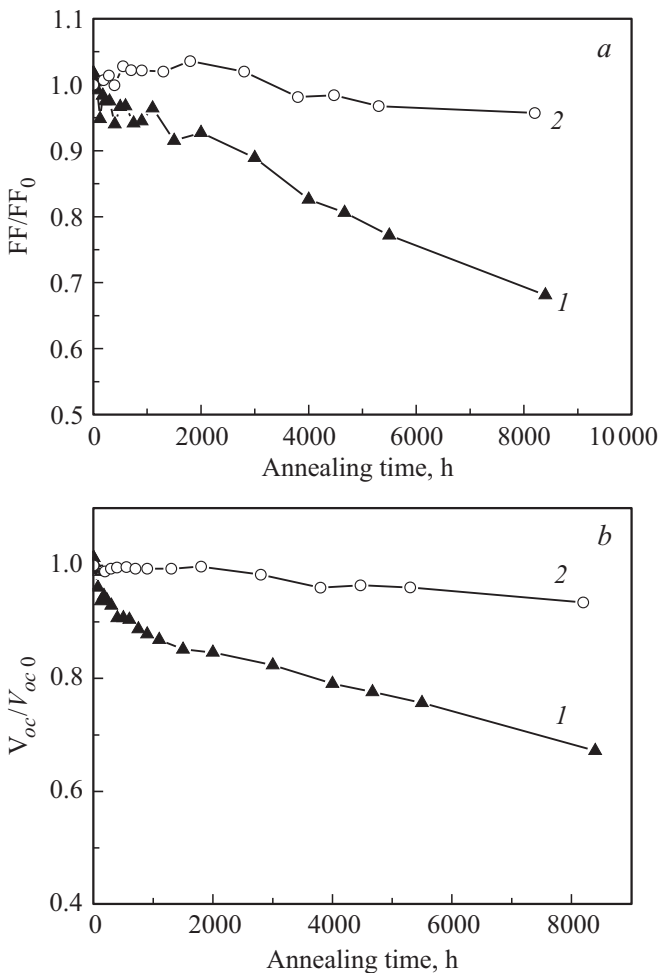


Рис. 6. Изменение фактора заполнения вольт-амперной характеристики FF (a) и напряжения холостого хода V_{oc} (b) фотоэлементов с разными контактными системами при прогреве до температуры $\sim 120^\circ\text{C}$. Ток короткого замыкания $J_{sc} = 1$ А/см². Контактные системы: Ti–Pt–Au (1) и Ti–Pt–Ag (2). FF_0 и V_{oc0} — исходные значения до прогрева.

меньшем удельном сопротивлении Ag по сравнению с золотом, что приводит к снижению сопротивления растекания по контакту при сохранении тех же толщин металлизации. В данной работе толщины слоев Ti и Pt составляли соответственно 10–30 и 30 нм. Общая толщина контакта достигала 1.0–1.5 мкм. Каждая из контактных систем позволяла создавать преобразователи с высоким значением фактора заполнения вольт-амперной характеристики FF и монохроматической эффективности η (рис. 5), а формирование фронтальной контактной сетки не приводило к появлению токов утечки. Особенности формирования контактной сетки к GaSb-фотопреобразователям с тонкой фотоактивной областью (0.3–0.5 мкм) были исследованы в работе [16].

При эксплуатации ФЭП в режиме непрерывной засветки мощным лазерным излучением его рабочая температура значительно возрастает, поэтому надежность металлизации особенно важна. Для фотоэлементов большой площади, собранных в модуль, проблема перегрева и отвода тепла будет особенно актуальна. Стабильность Ti–Pt–Ag как в процессе формирования контакта, так и при эксплуатации фотоэлектрического преобразователя в экстремальных условиях (температура $T \approx 200^\circ\text{C}$) значительно превосходит стабильность Ti–Pt–Au [16,17]. В [17] под темпом деградации фотоэлектрического преобразователя подразумевался период времени, в течение которого падение генерируемой мощности P не превышало 20% от исходного значения P_0 , и указанная величина определялась для температуры $\sim 200^\circ\text{C}$. В данной работе были продолжены исследования поведения фотоэлектрического преобразователя с данными контактными системами при достаточно высоких рабочих температурах ($\sim 120^\circ\text{C}$). Как и следовало ожидать, большей стабильностью фактора заполнения вольт-амперной характеристики FF и напряжения холостого хода V_{oc} обладают фотоэлементы с контактом Ti–Pt–Ag (рис. 6). Приведенные данные позволяют оценить время деградации ФЭП в условиях его нагрева до 120°C . Для системы Ti–Pt–Au этот период составил 1200 ч, а для Ti–Pt–Ag — более 9000 ч. Полученные результаты позволяют прогнозировать стабильность характеристик и эффективность длительной работы мощных преобразователей непрерывного лазерного излучения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (соглашение № 14.604.21.0089 от 27 июня 2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI 60414X0089).

Список литературы

- [1] J.T. Howell, M.J. O'Neill, R.L. Fork. *Proc. 5th Wireless Power Transmission Conf. together with 4th Intern. Conf. on Solar Power from Space* (Granada, Spain, 2004) p. 187.
- [2] S.D. Jarvis, J. Mukherjee, M. Perren, S.J. Sweeney. *IET Optoelectron.*, **8** (2), 64 (2014) [doi: 10.1049/iet-opt.2013.0066].

- [3] В.А. Богушевская, О.В. Заяц, Я.Н. Масляков, И.С. Мазак, А.А. Никонов, В.В. Савельев, А.А. Шептунов. Электрон. журн. „Труды МАИ“, № 51 (2012). www.mai.ru/science/trudy/
- [4] А.Н. Голиков, А.В. Дрондин, С.Г. Ребров, С.В. Янчур. Изв. АН. Энергетика, № 5, 131 (2012).
- [5] О.Н. Крохин. <http://scilance.com/library/book/15640>
- [6] E. Oliva, F. Dimroth, A.W. Bett. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **16**, 289 (2008).
- [7] J. Schubert, E. Oliva, F. Dimroth, R. Loeckenhoff, A.W. Bett. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **56** (2), 170 (2009) [doi: 10.1109/TED.2008.2010603].
- [8] M. Smith, B. Tillotson, J. Oliver, N. Tarasenko, T. Schoelzel, H. Brandhorst. *Proc. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (Austin, TX, USA, 2012)* p. 002 825.
- [9] В.М. Андреев. *Соврем. электроника*, № 6, 20 (2014).
- [10] R.K. Jain. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **40** (10), 1893 (1993).
- [11] А.Е. Маричев, В.П. Хвостиков. *Тез. докл. 15 Всерос. молодежной конф. по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике* (СПб., 2013) с. 24.
- [12] А.Е. Маричев, Р.В. Левин. *Тез. докл. Росс. молодежной конф. по физике и астрономии „Физика. СПб“* (СПб., 2013) с. 168.
- [13] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, V.S. Kalinovsky, V.A. Grikhes, V.D. Romyantsev, M.Z. Shvarts, V. Fokanov, A. Pavlov. *Proc. WCPEC-3 (Osaka, Japan, 2003)* paper 3P-B5-33.
- [14] В.М. Андреев, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. *ФТП*, **43** (5), 695 (2009).
- [15] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, V.D. Romyantsev, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts. *Proc. 28th IEEE PVSC (Alaska, 2000)* p. 1265.
- [16] Ф.Ю. Солдатенков, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, Ю.М. Задиранов, М.Г. Растегаева, А.А. Усикова. *ФТП*, **45** (9), 1266 (2011).
- [17] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, Ф.Ю. Солдатенков, Н.Х. Тимошина. *ФТП*, **48** (9), 1280 (2014).

Редактор Л.В. Шаронова

GaSb-based converter for laser power with wavelength of $\lambda \approx 1550$ nm

V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, F.Y. Soldatenkov,
N.Kh. Timoshina

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The laser power converters (LPCs) have been produced by using diffusion from the gas phase into the *n*-GaSb substrate. The photocells with the area of 4, 12.2, and 100 mm² have been fabricated and then tested by using a Xe flash lamp. The monochromatic (wavelength $\lambda = 1550$ nm) efficiency $\eta = 34.8\%$ has been achieved on the best samples, which had 12.2 mm² area, at the current density of 8 A/cm². The stability of the laser power converter and its degradation rate has been estimated at the operation temperature of 120°C.