

Модификация фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения ($\lambda = 808$ нм), получаемых методом жидкофазной эпитаксии

© В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, О.А. Хвостикова, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц

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

(Получена 4 октября 2017 г. Принята к печати 18 октября 2017 г.)

На основе однопереходных структур $n\text{-Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}-p\text{-Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}-p\text{-Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ методом эпитаксии из жидкой фазы получены преобразователи лазерного излучения (ЛИ) для длины волны $\lambda = 808$ нм, проведено их тестирование при равномерном (импульсный имитатор) и частично неравномерном (лазерный луч) распределении освещенности на фотоприемной поверхности. При равномерной засветке на образцах площадью $S = 4 \text{ см}^2$ при мощности 1.2 Вт достигнут монохроматический кпд $\eta = 53.1\%$. Для преобразователей с $S = 10.2 \text{ мм}^2$ кпд составил 58.3% при мощности лазерного излучения 0.7 Вт.

DOI: 10.21883/FTP.2018.03.45626.8740

1. Введение

При построении реальных лазерных систем дистанционного энергопитания требуется создание фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с высоким кпд для выбранных длин волн монохроматического излучения, устойчиво работающих при высоких освещенностях, повышенных температурах и неблагоприятных внешних факторах. Длина волны (λ) источника лазерного излучения (ЛИ) будет определять выбор полупроводникового материала, характеристики гетероструктуры и в целом устройство ФЭП.

По своим конструктивным особенностям преобразователи ЛИ для $\lambda = 808$ нм [1–3] близки к однопереходным солнечным элементам на основе GaAs. Однако лазерное излучение, в отличие от солнечного, монохроматично, неравномерно и ограничено по освещаемой области. Эти свойства требуют не только оптимизации структуры [4,5], контактной сетки [5] и просветляющих покрытий самих ФЭП ЛИ, но и особых подходов при построении модулей на их основе (специальная схема монтажа и коммутации в последовательные и параллельные цепочки элементов для компенсации неравномерности засветки; соответствие формы и размеров принимающей поверхности лазерному пятну; обеспечение эффективного отвода тепла при увеличении направленности и мощности ЛИ и т. п.).

Настоящая работа развивает исследования в области технологии изготовления ФЭП ЛИ с $\lambda = 808$ нм и фотоэлектрических модулей на их основе [2–4].

2. Эксперимент

2.1. Особенности гетероструктуры фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения

В работе [1] сообщалось о применении традиционной технологии солнечных элементов на основе

AlGaAs/GaAs для создания ФЭП ЛИ с $\lambda = 808$ нм. Структура такого преобразователя, полученного методом эпитаксии из жидкой фазы (ЖФЭ), состояла из базового слоя $n\text{-GaAs}$, эмиттера $p\text{-GaAs}$ и широкозонного оптического окна $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0.85$, поверх которого в ряде случаев дополнительно осаждался контактный слой $p\text{-GaAs}$. Под излучением ксеноновой лампы образцы площадью от $S = 4 \text{ мм}^2$ до 4 см^2 имели монохроматический кпд $\eta \approx 50\text{--}56.2\%$ [1].

В структурах ФЭП, оптимизированных для преобразования монохроматического излучения с длиной волны $\lambda = 808$ нм, $p\text{-}n$ -переход формировался в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x \approx 0.07$ (рис. 1). В отличие от солнечных элементов, для преобразователей ЛИ нет необходимости осаждения тонкого слоя широкозонного „окна“ с высоким содержанием алюминия, повышающего фоточувствительность в коротковолновой области спектра. По этой причине содержание Al было уменьшено до $x = 0.25\text{--}0.3$, а толщина слоя увеличена до 3–10 мкм. В процессе роста толстого высоколегированного „окна“ происходило

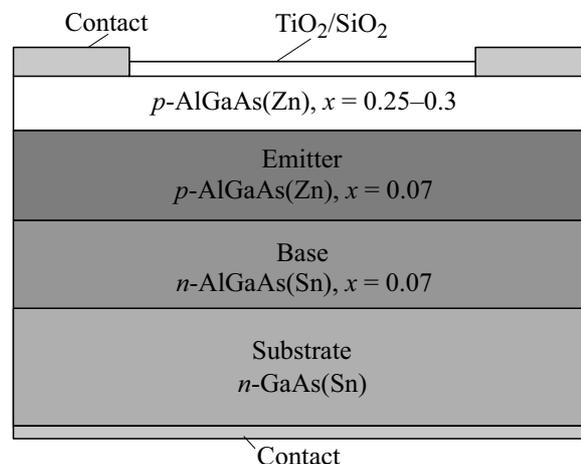


Рис. 1. Структура ФЭП ЛИ.

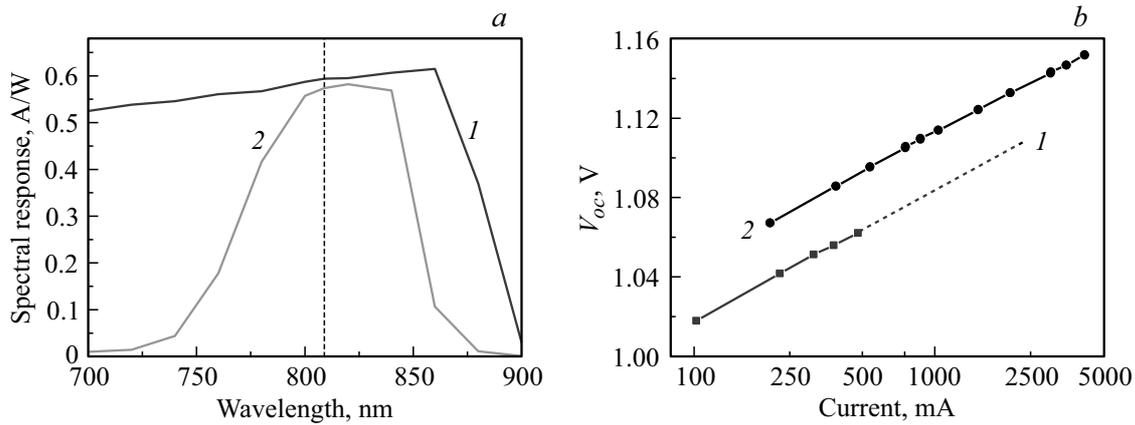


Рис. 2. Спектральная зависимость fotocувствительности (a) и зависимость напряжения холостого хода V_{oc} от фототока (b) ФЭП ЛИ, полученных с использованием традиционной (1) и усовершенствованной (2) технологий.

изменение коэффициента сегрегации и, следовательно, обеднение состава жидкой фазы алюминием. Содержание Al на поверхности значительно (до 10–15%) снижалось и не препятствовало качеству фронтальных контактов, исключая тем самым необходимость осаждения дополнительного контактного слоя и упрощая технологический цикл изготовления ФЭП ЛИ.

Рис. 2, a иллюстрирует различие в спектральной чувствительности для ФЭП ЛИ, изготовленных на основе традиционных (кривая 1) для солнечных элементов и разработанных (кривая 2) структур. На рис. 2, b сравниваются напряжения холостого хода V_{oc} фотоэлементов данных типов. Замена материала GaAs на $Al_{0.07}Ga_{0.93}As$ при формировании $p-n$ -перехода практически не сказалась на величине спектральной чувствительности ФЭП ЛИ при $\lambda = 808$ нм, обеспечив одновременно рост напряжения на 20 мВ.

2.2. Специфика постростовых операций

На фотоактивную поверхность ФЭП ЛИ наносилось двухслойное просветляющее покрытие TiO_2/SiO_2 , имеющее высокую стойкость к мощным световым потокам и минимум отражения при $\lambda = 808$ нм (коэффициент отражения $R \approx 0.2\%$). При импульсной засветке лазерным излучением следы видимых повреждений TiO_2/SiO_2 отсутствуют вплоть до $\sim 4 \cdot 10^3$ Вт/см², что значительно выше рабочих значений плотности мощности, преобразуемой разработанными ФЭП. Отражение от свободной поверхности преобразователя до и после нанесения просветляющих пленок показано на рис. 3.

Для снижения омических потерь ФЭП ЛИ на фронтальную контактную сетку, сформированную термическим испарением в вакууме Cr–Au, электролитически осаждался слой металла. Замена гальванического золота на серебро (рис. 4) и увеличение толщины пленки от 2 до 4 мкм позволили сместить падение фактора заполнения вольт-амперной характеристики (FF) и КПД (η) в область больших значений мощности преобразуемого ЛИ.

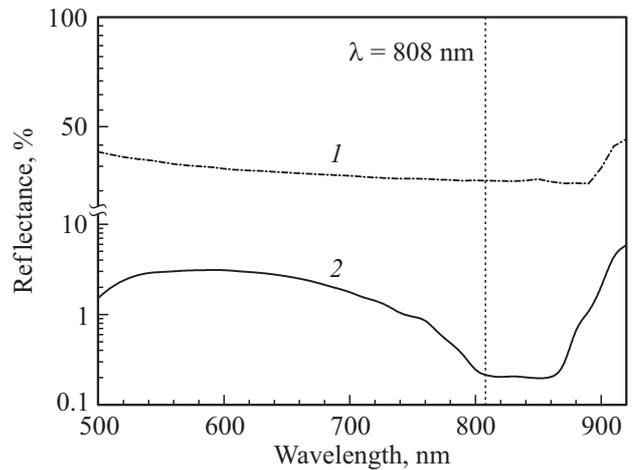


Рис. 3. Отражение от поверхности ФЭП ЛИ без антиотражающего покрытия (1) и с TiO_2/SiO_2 (2).

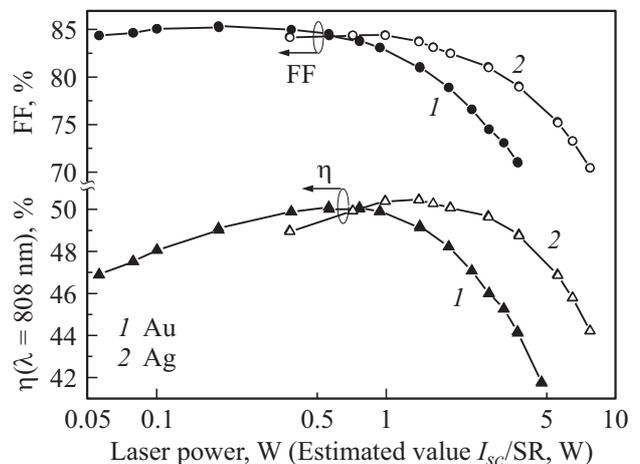


Рис. 4. FF и КПД (оценка при равномерной засветке) преобразователей площадью 4 см² с золото- (1) и серебросодержащими (2) фронтальными контактами.

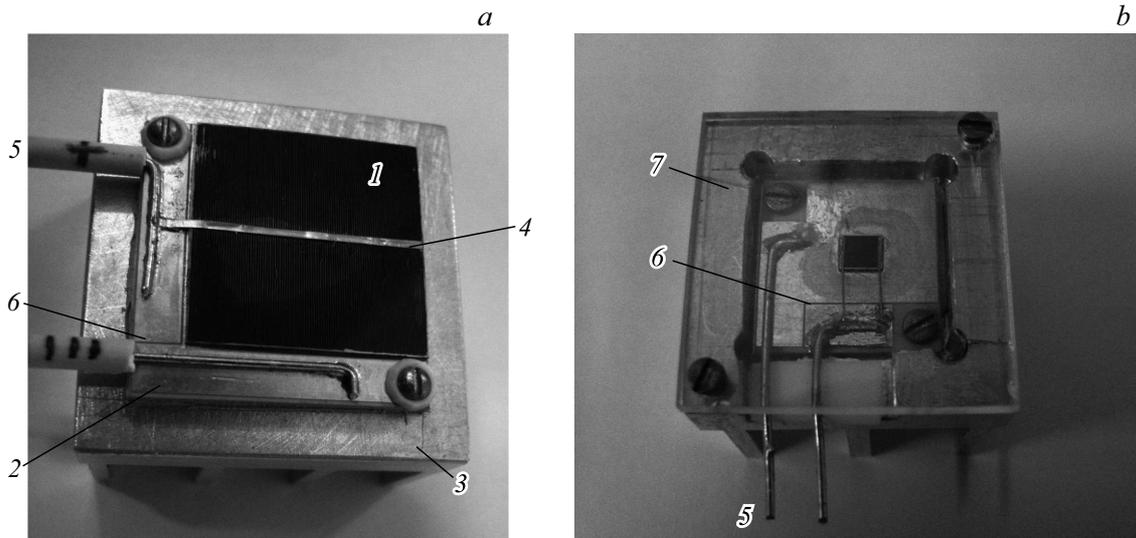


Рис. 5. Фотографии ФЭП ЛИ: 1 — чип размером $20 \times 20 \text{ мм}$ (a) или $3.0 \times 3.4 \text{ мм}$ (b), 2 — алюминиевое основание с диэлектрической и медной пленками, 3 — радиатор, 4 — медная лента, 5 — электрические выводы, 6 — контактный рисунок на плате, 7 — стекло для транспортировки.

2.3. Конструктивное оформление макета и монтаж чипов

При монтаже чипов ФЭП ЛИ (рис. 5, a, b) применялись паяльные пасты на базе сплава PbSnAg с температурой плавления 180°C . Преобразователь (1) устанавливался на изолирующее основание (2) с высокими теплопроводностью, термостойкостью и совместимостью по коэффициенту термического расширения с подложкой GaAs. К фронтальным токосборным шинам чипа припаивалась медная луженая лента толщиной 0.1 мм (4). В качестве изоляционных оснований были выбраны печатные платы из сплава алюминия, слоя диэлектрика и медной фольги с лужением. Для улучшения отвода тепла от фотоэлемента они устанавливались на металлический

радиатор (3). На поверхности плат формировался контактный рисунок (6).

На рис. 5, b поверхность чипа защищена оргстеклом, которое устанавливалось на период хранения и транспортировки ФЭП ЛИ и удалялось при его эксплуатации.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Характеристики фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения при равномерной облученности

Исследование динамики фотоэлектрических параметров ФЭП от мощности ЛИ проводилось при равномер-

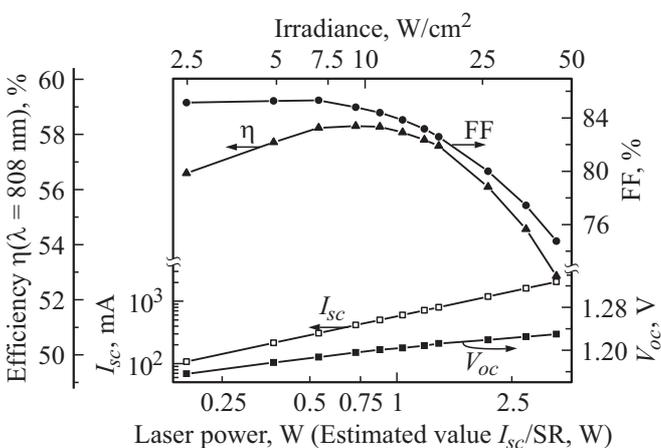


Рис. 6. Зависимости кпд, V_{oc} и FF от мощности ЛИ для ФЭП площадью $S = 10.2 \text{ мм}^2$ при равномерной облученности его поверхности.

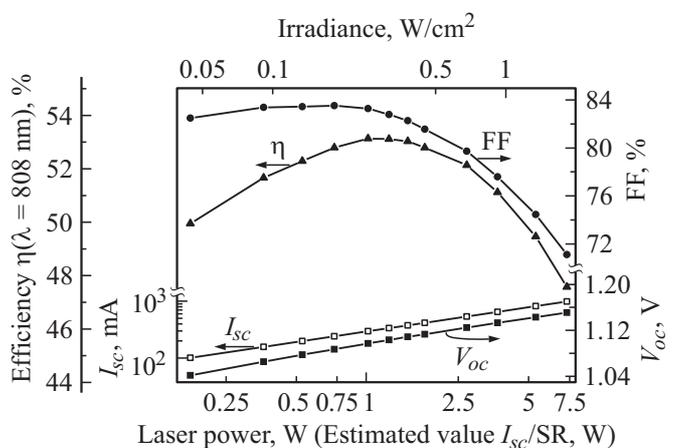


Рис. 7. Зависимости кпд, V_{oc} и FF для ФЭП площадью $S = 4 \text{ см}^2$ от мощности ЛИ при равномерной облученности его поверхности.

ном (импульсный имитатор) и частично неравномерном (лазерный луч) распределении освещенности на фотоприемной поверхности.

Коэффициент полезного действия (η), напряжение холостого хода (V_{oc}) и фактор заполнения нагрузочной характеристики (FF) для преобразователей разных типов при засветке импульсным имитатором представлены на рис. 6, 7. Эквивалентная мощность лазерного излучения определялась как отношение I_{sc}/SR в предположении линейного роста фототока с освещенностью, где I_{sc} — ток короткого замыкания, SR — спектральная чувствительность ФЭП на длине волны 808 нм, А/Вт. Для преобразователя с $S = 10.2 \text{ мм}^2$ при эквивалентной мощности 0.7 Вт достигнут максимальный монохроматический КПД $\eta = 58.3\%$ (рис. 6). Параметры ФЭП ЛИ с $S = 4 \text{ см}^2$ уступают указанным образцам за счет роста омических потерь, связанных с увеличением сопротивления растекания при повышении площади фотоэлемента. При мощности 1.2 Вт на таких образцах получен КПД $\eta = 53.1\%$ (рис. 7).

3.2. Характеристики фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения с $\lambda = 808 \text{ нм}$

В лаборатории фотоэлектрических преобразователей ФТИ им. А.Ф. Иоффе имеется возможность тестирования ФЭП малой площади непосредственно при облучении потоком ЛИ, подводимым к образцу по оптоволокну. Контроль мощности ЛИ в этом случае производился термомпарным измерителем Gentec-EO XPL12-3S-H2, а размер лазерного пятна и профиль распределения освещенности в нем (рис. 8) — профилометром лазерного луча типа Gentec Beamage-CCD23 [6].

Исследовались ФЭП площадью $S = 4 \text{ мм}^2$. Измеренное значение спектральной чувствительности составило 0.55 А/Вт ($\lambda = 808 \text{ нм}$) для диапазона мощностей ЛИ 0.1–1 Вт (точка *a* на рис. 9).

Это значение близко к величине 0.56 А/Вт ($\lambda = 808 \text{ нм}$), определенной при измерении спектральной зависимости

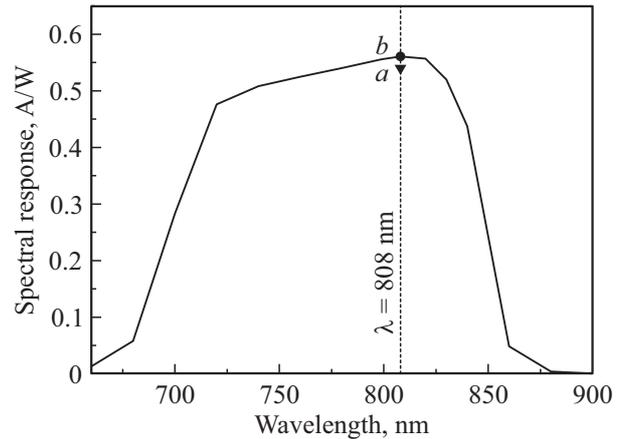


Рис. 9. Спектральная зависимость ФЭП ЛИ.

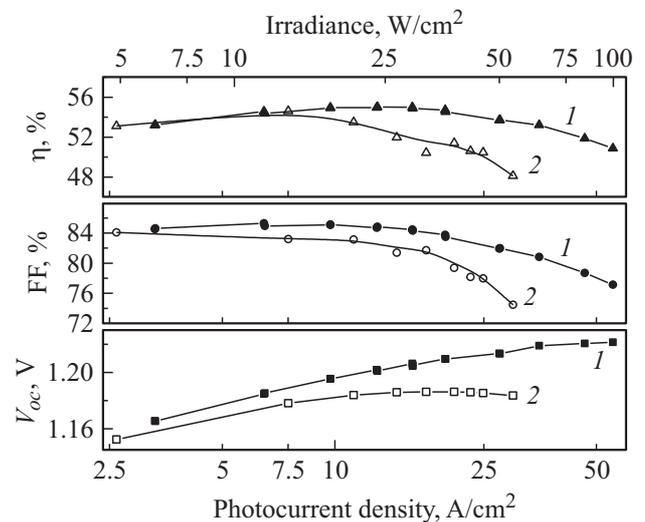


Рис. 10. Зависимости фотоэлектрических параметров ФЭП ЛИ от плотности генерируемого фототока при равномерном (1, импульсный имитатор) и частично неравномерном (2, лазерный луч) распределении освещенности на фотоприемной поверхности.

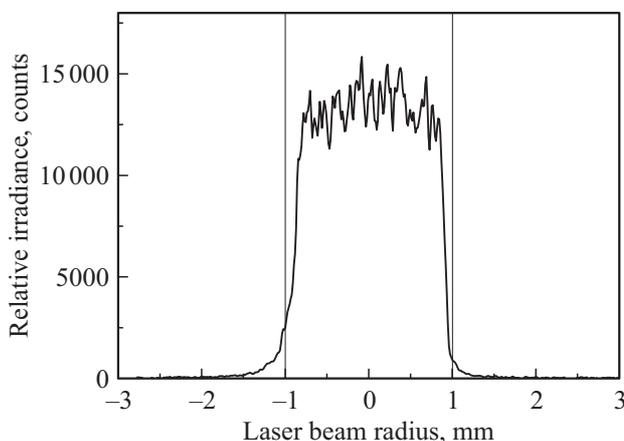


Рис. 8. Распределение освещенности в пятне ЛИ.

фоточувствительности (точка *b* на рис. 9) [7]. Таким образом, результаты для двух независимых методов определения SR имеют хорошую сходимость. Несколько меньшее значение спектральной чувствительности при воздействии на ФЭП лазерным лучом следует связывать с характеристиками светового пучка ЛИ. Так, анализ профиля распределения освещенности на ФЭП (рис. 8) показывает, что небольшая доля ЛИ (диаметр пятна 2.3 мм) выходит за пределы фоточувствительной поверхности элемента (диаметр 2 мм) и оказывается потерянной для преобразования, в то время как измеритель Gentec-EO XPL12-3S-H2 регистрирует полную мощность подводимого к ФЭП излучения.

Сравнение фотоэлектрических параметров ФЭП ЛИ с $S = 4 \text{ мм}^2$ при равномерном и частично неравномерном

распределении освещенности на фотоприемной поверхности приведено на рис. 10. Мощность лазерного излучения варьировалась в диапазоне от 0.1 до 1 Вт, что соответствует плотности мощности ЛИ от 5 до 100 Вт/см². Максимальная эффективность преобразования ЛИ составила 54.5% при плотности генерируемого фототока 7.5 А/см². Дальнейшее увеличение мощности ЛИ ведет к росту потерь на последовательном сопротивлении (снижению FF) и уменьшению напряжения холостого хода из-за неконтролируемого нагрева ФЭП ЛИ. При измерениях вольт-амперных характеристик ФЭП на импульсном имитаторе (длительность светового импульса 1 мс) нагрев образца удается исключить, что обеспечивает логарифмический рост напряжения холостого хода вплоть до предельных освещенностей. Снижение доли резистивных потерь при переходе к равномерной засветке позволяет сохранить достаточно высокие значения фактора заполнения вольт-амперной характеристики в диапазоне плотностей генерируемого тока до 20 А/см² при незначительном увеличении КПД, до 55%.

4. Заключение

Исследована возможность оптимизации гетероструктур AlGaAs/GaAs с целью создания методом ЖФЭ высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения с $\lambda = 808$ нм. Формирование $p-n$ -перехода в Al_{0.07}Ga_{0.93}As повышает V_{oc} ФЭП ЛИ и дает возможность получения действующих макетов преобразователей с монохроматическим КПД $\eta > 58\%$. Увеличение площади образцов от $S = 10.2$ мм² до 4 см² снижает эффективность на 5%. При переходе к прямой засветке лазерным излучением возникает радиационный нагрев ФЭП, что сказывается на напряжении холостого хода. В совокупности с возрастающими резистивными потерями из-за неравномерной освещенности это ведет к уменьшению значений КПД ФЭП ЛИ в сравнении с величинами, получаемыми при облучении короткими импульсами (1 мс).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-30035)

Список литературы

- [1] L.C. Olsen, D.A. Huber, G. Dunham, F.W. Addis. *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialist Conf.* (N.Y., USA, 1991) p. 419.
- [2] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, О.А. Хвостикова, Н.Х. Тимошина. *ФТП*, **51** (5), 676 (2017).
- [3] В.М. Андреев. *Альтернативный киловатт*, **6** (18), 1 (2012).
- [4] В.П. Хвостиков, Н.А. Калужный, С.А. Минтаиров, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, В.М. Емельянов, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев. *ФТП*, **50**, 1242 (2016).
- [5] В.М. Емельянов, С.А. Минтаиров, С.В. Сорокина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. *ФТП*, **50**, 125 (2016).

- [6] *Электронный ресурс* <https://www.gentec-eo.com>
- [7] M.Z. Shvarts, A.E. Chalov, E.A. Ionova, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, V.D. Rumyantsev, S.S. Titkov. *Proc. 20th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Barcelona, Spain, 2005) p. 278.

Редактор Л.В. Шаронова

Modification of laser power converters ($\lambda = 808$ nm) by using LPE

V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, O.A. Khvostikova, N.Kh. Timoshina, M.Z. Shvarts

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Basing on n -Al_{0.07}Ga_{0.93}As– p -Al_{0.07}Ga_{0.93}As– p -Al_{0.25}Ga_{0.75}As single-junction heterostructures, we have produced laser power converters with the wavelength of 808 nm by using LPE, and carried out their testing in cases of uniform (i. e., with a flash lamp) and partly non-uniform illumination of the photodetector. In the former case the monochromatic efficiency $\eta = 53.1\%$ has been achieved for the samples of 4 cm² in area (S) at the power of 1.2 W. At $S = 0.1$ cm² the efficiency is found to be 58.3% at the 0.7 W power.