

Метаморфные InGaAs/GaAs-гетероструктуры для радиационно стойких фотопреобразователей лазерного излучения

© М.З. Шварц, В.М. Емельянов, П.Д. Корниенко, В.Р. Ларионов, С.А. Левина, С.А. Минтаиров, М.В. Нахимович, Р.А. Салий, Н.А. Калюжный

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

E-mail: shvarts@scell.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 6 мая 2025 г.

В окончательной редакции 8 июля 2025 г.

Принята к публикации 27 июля 2025 г.

Представлены решения для повышения радиационной стойкости фотоэлектрических преобразователей на основе метаморфных $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -гетероструктур со встроенным брегговским отражателем, оптимизированных на эффективное преобразование мощного лазерного излучения с длиной волны 1000–1100 нм. Получены экспериментальные зависимости деградации фотоэлектрических параметров преобразователей от дозы (флюенса) электронов с энергиями 2 и 4.5 МэВ.

Ключевые слова: фотоэлектрический приемник-преобразователь, лазерное излучение, метаморфная гетероструктура, радиационная стойкость.

DOI: 10.61011/FTP.2025.05.61475.8124

Фотоэлектрические приемники-преобразователи лазерного излучения (LPC — laser power converters) находят все более широкое применение при дистанционном (с передачей энергии по оптоволокну или по открытым каналам) энергопитании систем и устройств. Доступная на сегодняшний день номенклатура мощных лазеров охватывает несколько основных спектральных диапазонов длин волн, в том числе отвечающих полосам прозрачности атмосферы (для открытых каналов передачи энергии) и оптоволокну (для соответствующих трактов). Здесь наибольший интерес представляют спектральные диапазоны, для которых, с одной стороны, имеются мощные источники лазерного излучения (800–860, 1064 нм и др.), а с другой — возможно эффективное преобразование энергии полупроводниковыми LPC, „настроенными“ на выбранную длину волны лазерного излучения и оптимизированными по конструктивным и функциональным параметрам на работу при повышенных освещенностях [1–4].

Потребность в беспроводном или оптоволоконном питании устройств (контрольно-диагностического оборудования и пр.), находящихся в зонах с высоким уровнем радиационного воздействия, к которым относятся условия космического пространства и незранированные зоны атомных (ядерных) реакторов, ускорителей заряженных частиц, изотопных источников и других объектов, требует разработки соответствующих гетероструктур для радиационно стойких LPC. Эффективный способ повышения радиационной стойкости LPC — это сокращение толщин фотоактивных слоев при сохранении доли поглощаемого излучения за счет встраивания в структуру брегговского отражателя (BR — Bragg reflector), играющего роль селективного зеркала (для излучения с длиной волны, соответствующей или близкой к краю

фундаментального поглощения материала) и тыльного потенциального барьера для фотогенерированных носителей заряда [5,6]. Для GaAs LPC диапазона 800–860 нм результаты исследований радиационной деградации достаточно широко представлены в литературе, что связано с использованием данного полупроводникового материала в космических солнечных элементах [7,8].

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -субэлементы с составом по In до 30 % рассматриваются в качестве узкозонного каскада (с фоточувствительностью до 1200 нм) монокристаллических многопереходных солнечных элементов [9]. Однако опубликованные результаты исследований их радиационной стойкости крайне ограничены [10,11].

В работе представлены решения для LPC на основе метаморфных $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -гетероструктур с BR, оптимизированных на эффективное преобразование мощного лазерного излучения (ЛИ) с длиной волны 1000–1100 нм, и выполнена оценка их радиационной стойкости при облучении высокоэнергетичными (2 и 4.5 МэВ) электронами.

Метаморфные $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -гетероструктуры для LPC изготавливались методом металлоорганической газовой эпитаксии в реакторе лабораторного типа AIX 200/4 [8,12] (рис. 1). Достижение максимальных значений спектральной фоточувствительности в целевом диапазоне длин волн обеспечивалось при содержании In в диапазоне 17–21 %. BR формировались на основе 12–18 пар слоев материалов $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_x(\text{GaAl})_{1-x}\text{As}$. Расчет толщин слоев BR проводился на основе данных по спектральным зависимостям показателя преломления, получаемых по методике из работы [13]. Установлено, что оптимальным вариантом BR является конструкция на основе материалов $\text{In}_{0.17}(\text{Ga}_{0.88}\text{Al}_{0.12})_{0.83}\text{As}/\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{As}$ со сниженным

уровнем поглощения длинноволнового излучения в слоях отражателя и их малым последовательным сопротивлением за счет использования теллура в качестве легирующей примеси [14].

Исследованы оптические процессы прохождения и поглощения излучения в фотоактивных слоях, отражения от LPC и самопоглощения в BR излучения диапазона целевых длин волн 1000–1100 нм. Проработано решение для структуры LPC с BR, при использовании которой должно обеспечиваться повышение радиационной стой-

$\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As-}p^+(\text{Zn})$	Contact layer
$\text{In}_{0.17}\text{AlGaAs-}p(\text{Zn})$	"Window"
$\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As-}p(\text{Zn})$ [500 nm]	Emitter
$\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As-}n(\text{Si})$ [450–3000 nm]	Base
$\text{In}_{0.17}\text{GaAlAs-}n(\text{Si})$	BL
$\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{As-}n(\text{Te})$	× 18 BR
$\text{In}_{0.17}(\text{Ga}_{0.88}\text{Al}_{0.12})_{0.83}\text{As-}n(\text{Te})$	
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-}n(\text{Si})$	MB
$\text{GaAs-}n(\text{Si})$	Substrate

Рис. 1. Схематическое изображение гетероструктуры метаморфного LPC для радиационных испытаний: BL (buffer layer) — барьерный слой, BR (Bragg reflector) — брегговский отражатель, MB (metamorphic buffer) — метаморфные буферные слои.

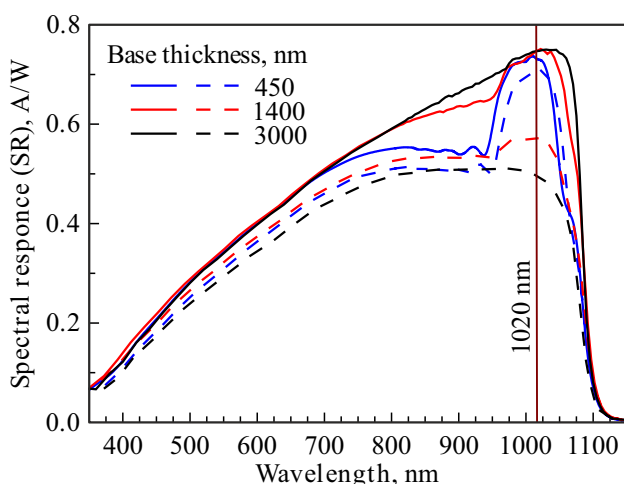


Рис. 2. Спектральные зависимости фоточувствительности экспериментальных образцов LPC на основе $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ -гетероструктур с BR при различной толщине базовой области до облучения 2 МэВ электронами с флюенсом $5 \cdot 14 \text{ e/cm}^2$ (сплошные линии) и после него (пунктирные линии). Зависимости представлены без учета оптических потерь из-за отражения излучения.

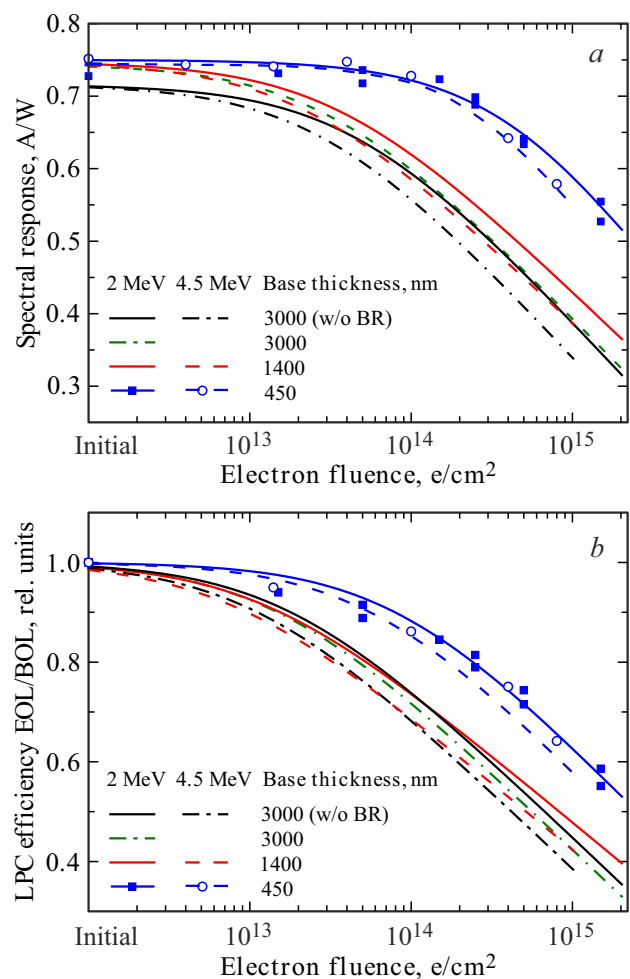


Рис. 3. Спектральная чувствительность на целевой длине волны $\lambda = 1020 \text{ nm}$ (a) и эффективность при плотности мощности излучения 5 Вт/см^2 (b) для экспериментальных образцов LPC на основе $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ -гетероструктур с BR в зависимости от флюенса электронов с энергией 2 и 4.5 МэВ. Экспериментальные точки представлены на зависимостях для образцов LPC с толщиной базовой области 450 нм.

кости прибора: использование „предельно“ утонченной активной области.

Выполнен рост структур с активной областью в материале $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$: эмиттер 500 нм, базовый слой 3000, 1400, 450 нм, $\text{In}_{0.17}(\text{Ga}_{0.88}\text{Al}_{0.12})_{0.83}\text{As}/\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{As}$ BR — 18 пар слоев. При выбранном составе для активной области максимум спектральной чувствительности экспериментальных LPC регистрировался на длине волны 1020–1030 нм и составлял ~ 0.74 и $\sim 0.69 \text{ A/Вт}$ для образцов с базовой областью 1400–3000 и 450 нм соответственно. Несколько меньший фотоотклик у LPC с тонкой базой следует связывать с неполным поглощением излучения, отраженного от BR. Также отличие в некоторой степени может определяться качеством метаморфных базовых слоев и вариациями при настройке оптических характеристик BR в изготавливаемых структурах.

Для радиационных испытаний был подготовлен набор $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ LPC размером 3×3.4 мм с фотоприемной поверхностью 2.8×2.8 мм, включающей токоотводящие шины шириной 5 мкм и шагом 100 мкм. Выполнен комплекс экспериментов по радиационному облучению LPC электронами с энергией 2 и 4.5 МэВ до достижения предельного флюенса $1 \cdot 10^{16}$ е/см².

Результаты экспериментов, представленные на рис. 2 и 3, показали преимущество LPC на основе гетероструктуры с тонкой активной областью (базовый слой 450 нм) во всем диапазоне флюенсов. Снижение спектральной чувствительности на целевой длине волны для LPC с тонкой базой не превысила 15 % при флюенсе $1 \cdot 10^{15}$ е/см², тогда как для образцов с толщинами базового слоя 1400 и 3000 нм падение параметра составило 31 и 40 % соответственно. Следует отметить, что BR перестает играть решающую роль в обеспечении повышенной радиационной стойкости LPC при использовании структур с толстым (3000 нм) базовым слоем: регистрируются идентичные деградационные зависимости фотоэлектрических параметров для приборов со встроенным отражателем и без него. Для всех вариантов LPC снижение напряжения холостого хода по мере набора флюенса оказывается одинаковым.

Испытания показали, что уменьшение толщины $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -базы в гетероструктуре с 3000 до 1400 нм не оказывает существенного влияния на радиационную стойкость LPC. В то же время сокращение базы LPC до 450 нм позволяет уже при флюенсах $> 1 \cdot 10^{13}$ е/см² электронов с энергией 2 и 4.5 МэВ получить преимущество в спектральной чувствительности и КПД по сравнению с LPC с толстой базой.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C. Algora, I. García, M. Delgado, R. Peña, C. Vázquez, I. Rey-Stolle. *Joule*, **6** (2), 340 (2022). DOI: 10.5281/zenodo.6620474
- [2] Y. Zheng, G. Zhang, Zh. Huan, Y. Zhang, G. Yuan, Q. Li, G. Ding, Zh. Lv, W. Ni, Yu. Shao, X. Liu, J. Zu. *SSPWT*, **1** (1), 17 (2024). DOI: 10.1016/j.sspwt.2023.12.001
- [3] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **262**, 112551 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112551
- [4] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **217**, 110710 (2020). DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110710
- [5] M.Z. Shvarts, O.I. Chosta, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, V.M. Andreev. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **68**, 105 (2001). DOI: 10.1016/S0927-0248(00)00349-4
- [6] V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov. *Semiconductors*, **44**, 1600 (2010). DOI: 10.1134/S1063782610120122
- [7] J.M. Raya-Armenta, N. Bazmohammadi, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **233**, 111379 (2021). DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111379
- [8] M. Klitzke, J. Schön, R.H. Van Leest, G.M.M.W. Bissels, E. Vlieg, M. Schachtner, F. Dimroth, D. Lackner. *EPJ Photovolt.*, **13**, 25 (2022). DOI: 10.1051/epjpv/2022024
- [9] N. Gruginskie, F. Cappelluti, G.J. Bauhuis, P. Mulder, E. Haverkamp, E. Vlieg, J. Schermer. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **28**, 266 (2020). DOI: 10.1002/pip.3224
- [10] M. Imaizumi, T. Takamoto, T. Sumita, T. Ohshima, M. Yamaguchi, S. Matsuda, A. Ohi, T. Kamiya. *Proc. 3rd World Conf. on PV Energy Conversion*, **1**, 599 (2003).
- [11] M. Imaizumi, T. Nakamura, T. Takamoto, T. Ohshima, M. Tajima. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **25**, 161 (2017). DOI: 10.1002/pip.2840
- [12] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts. *AIP Conf. Proc.*, **2298**, 030001 (2020). DOI: 10.1063/5.0032903
- [13] V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts. *Opt. Express*, **26** (18), A832 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.00A832
- [14] V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts. *Semiconductors*, **54** (4), 476 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620040053

Редактор А.Н. Смирнов

Metamorphic InGaAs/GaAs heterostructures for radiation-resistant laser power converters

M.Z. Shvarts, V.M. Emelyanov, P.D. Kornienko,
V.R. Larionov, S.A. Levina, S.A. Mintairov,
M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, N.A. Kalyuzhnyy

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Solutions are presented for photovoltaic converters based on metamorphic $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterostructures with a built-in Bragg reflector. Photovoltaic converters are optimized for efficient operation under power laser radiation with a wavelength of 1000–1100 nm. Experimental estimates of the photovoltaic parameters degradation rate are obtained at converters irradiation with 2 and 4.5 MeV electrons.