

УДК 538.951, 538.956

EDN: XBKOMQ DOI: 10.31429/vestnik-22-3-56-61

Фотоэлектрические характеристики термофотоэлектрических преобразователей n –InAs/ n –GaInPSbAs/ p –GaInPSbAs

М. Л. Лунина¹, Л. С. Лунин^{1,2✉}, А. В. Донская²¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, пр. Чехова, 41, Ростов-на-Дону, 344006, Россия² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, ул. Просвещения, 132, Новочеркасск, 346428, Россия

✉ Лунин Леонид Сергеевич; ORCID 0000-0002-5534-9694; SPIN 4735-7317; e-mail: lunin_ls@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследований, направленные на создание методом зонной перекристаллизации градиентом температуры (ЗПГТ) высокоеффективных термоэлектрических преобразователей n –InAs/ n –GaInPSbAs/ p –GaInPSbAs/ p –AlGaAsSb, работающих в спектральном диапазоне 0,5–2,5 мкм. Использование пятикомпонентных твердых растворов GaInPSbAs в качестве активной области термофотоэлектрических (ТФЭ) преобразователей позволяет оценить путем изменения концентрации компонентов влияние плотности дислокаций несоответствия на оптические и спектральные характеристики ТФЭ-преобразователей: внешний квантовый выход, напряжение холостого хода U_{xx} , фактора заполнения FF и плотность тока короткого замыкания j .

Ключевые слова: плотность дислокаций, напряжение холостого хода, фактор заполнения, плотность тока.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий ФИЦ ЮНЦ РАН №125011200142-7, а также в рамках инициативной НИР ЮРГПУ(НПИ) №ПЗ-392.

Цитирование: Лунина М. Л., Лунин Л. С., Донская А. В. Фотоэлектрические характеристики термофотоэлектрических преобразователей n –InAs/ n –GaInPSbAs/ p –GaInPSbAs // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2025. Т. 22, № 3. С. 56–61. EDN: XBKOMQ. DOI: 10.31429/vestnik-22-3-56-61

Поступила 7 июня 2025 г. После доработки 12 июля 2025 г. Принято 21 июля 2025 г. Публикация 22 сентября 2025 г.

Идея/концепция работы (Лунина М.Л., Лунин Л.С.), проведение экспериментов (Лунина М.Л.), вычислений, расчетов, анализ данных (Лунин Л.С., Донская А.В.), написание статьи (Лунин Л.С., Донская А.В.), внесение правок, утверждение окончательного варианта (Лунина М.Л.). Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2025. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY).

Photovoltaic Characteristics of n –InAs/ n –GaInPSbAs/ p –GaInPSbAs Thermophotovoltaic Converters

M. L. Lunina¹, L. S. Lunin^{1,2✉}, A. V. Donskaya²¹ Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 41, Chekhov ave., Rostov-on-Don, 344006, Russia² Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya st., Novocherkassk, 346428, Russia

✉ Leonid S. Lunin; ORCID 0000-0002-5534-9694; e-mail: lunin_ls@mail.ru

Abstract. This study investigates the photovoltaic characteristics of thermophotovoltaic (TPV) converters based on n –InAs/ n –GaInPSbAs/ p –GaInPSbAs heterostructures, focusing on the impact of dislocation density on their performance. The research aims to enhance the efficiency of TPV converters operating in the spectral range of 0.5–2.5 μ m by employing five-component GaInPSbAs solid solutions as the active region. The heterostructures were grown using zone recrystallization with a temperature gradient, ensuring high crystalline perfection and lattice matching with InAs substrates. Theoretical analysis included calculations of bandgap energy, lattice parameters, and spinodal decomposition regions, while experimental work involved the synthesis of epitaxial layers and characterization of their structural and optoelectronic properties. Key findings reveal that lattice-matched GaInPSbAs layers with low dislocation densities ($7 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2}$)

exhibit superior photovoltaic performance, achieving an external quantum yield of 0.85, an open-circuit voltage of 0.35 V, and a fill factor of 60%. In contrast, mismatched layers with higher dislocation densities ($1 \cdot 10^5 \text{ cm}^2$) demonstrate degraded electrical characteristics. The study highlights the critical role of parameter minimizing lattices mismatch and dislocation densities to optimize TPV converter efficiency.

Keywords: dislocation density, closed-circuit voltage, fill factor, current density.

Funding. The work was carried out within the framework of state assignments of the Federal Research Center of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences no. 125011200142-7, as well as within the framework of the initiative research work of the Platov Polytechnical University (NPI) no. PZ-392.

Cite as: Lunina, M. L., Lunin, L. S., Donskaya, A. V., Photovoltaic characteristics of n-InAs/n-GaInPSbAs/p-GaInPSbAs thermophotovoltaic converters. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2025, vol. 22, no. 3, pp. 56–61. DOI: 10.31429/vestnik-22-3-56-61

Received 7 June 2025. Revised 12 July 2025. Accepted 21 July 2025. Published 22 September 2025.

The idea/concept of the work (Lunina M. L., Lunin L. S.), experiments (Lunina M. L.), calculations, data analysis (Lunin L. S., Donskaya A. V.), writing the article (Lunin L. S., Donskaya A. V.), making corrections, approval of the final version (Lunina M. L.). The authors declare no competing interests.

© The Author(s), 2025. The article is open access, distributed under Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY) license.

Введение

В термофотоэлектрических генераторах с пониженной температурой эмиттера ~ 1273 К применяются фотоэлементы на основе узкозонных соединений A^3B^5 [1–3]. Эффективность работы данных фотоэлементов зависит от использования в качестве активной области ТФЭ-преобразователя (ТФЭП) твердых растворов высокого кристаллического совершенства, изопериодных подложке. Таковыми являются пятикомпонентные твердые растворы, совпадающие параметрами решетки и коэффициентами термического расширения (КТР) с подложками [4].

Цель работы состоит в исследовании влияния плотности дислокаций несоответствия на фотоэлектрические характеристики ТФЭП, изготовленных на гетероструктурах InAs–GaInPSbAs.

1. Теоретический анализ

Для выращивания гетероструктур InAs/GaInPSbAs необходимы знания о пределах изменения ширины запрещенной зоны твердого раствора GaInPSbAs, его устойчивости к спинодальному распаду и зависимостях параметров кристаллической решетки от концентрации компонентов, составляющих твердый раствор $Ga_xIn_{1-x}P_ySb_zAs_{1-y-z}$. Расчеты ширины запрещенной зоны (E_g), периода кристаллической решетки $a(x, y, z)$ твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}P_ySb_zAs_{1-y-z}$ проводили по уравнениям работы [5]. Расчет областей спинодального распада был проведен по методике, описанной нами ранее [6].

В данной гетероструктуре с увеличением концентрации фосфора в твердой фазе (y) изопериодические линии смещаются в сторону меньших концентраций галлия (x), как это видно из рис. 1. Области спинодального распада существенно расширяются с ростом содержания фосфора, и, следовательно, все больше изопериодических составов попадает в эту область (рис. 1, пунктирные линии). Однако рассогласование параметров решеток подложки и слоя на величину $\delta a = 0,1\%$ вызывает напряженность на гетерогранице, которая частично предотвращает спинодальный распад [7].

Ширина энергетического зазора полупроводника GaInPSbAs имеет значения менее 800 мэВ для Г-переходов (рис. 2). Отклонение от линейности функции $E_g(x)$ наблюдается в области составов с наибольшим упорядочением $\Delta a/a$, которое соответствует интервалам $0,47 \leq x \leq 0,99$ и $0,01 \leq y \leq 0,30$.

В табл. 1 приведены интервалы составов, в которых имеет место согласование КТР подложки и слоя с различной точностью δa . Анализ данных показывает, что согласование по КТР проявляется в достаточно широких интервалах (x) и с ростом концентрации фосфора (y) улучшается. При малых x для этой гетероструктуры разность КТР слоя и подложки практически равна нулю.

Таблица 1. Области согласования по КТР твердого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{Sb}_z\text{As}_{1-y-z}$ с подложкой InAs

y , мол. доли	$\delta\alpha = 5\%$	$\delta\alpha = 10\%$
	x , мол. доли	
0,1	0–0,25	0–0,43
0,2	0–0,28	0–0,47
0,3	0–0,33	0–0,50
0,4	0–0,36	0–0,54
0,5	0–0,40	0–0,58
0,6	0–0,44	0–0,64
0,7	0,05–0,48	0–0,70
0,8	0,08–0,55	0–0,75
0,9	0,13–0,59	0–0,82

2. Экспериментальная часть

Выращивание твердых растворов GaInPSbAs осуществлялось методом зонной перекристаллизации градиентом температуры (ЗПГТ). Подложкой служили пластины из арсенида индия, ориентированные в плоскости (100), n -типа проводимости с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, жидкую зону представляла собой раствор-расплав (Ga, In, P, As, Sb). Толщина жидкой зоны изменялась от 10 до 200 мкм. В качестве источника применяли предварительно синтезированные поликристаллы для получения толстых слоев более 50 мкм и пластины GaP и GaAs для тонких пленок. Печь позволяла изменять температуру от комнатной до 1000 К и градиент температуры в пределах 10–100 К/см. Камеру в начале откачивали до давления 10^{-3} Па, а затем наполняли водородом до 0,5 Па. Процесс ЗПГТ проводили в протоеке водорода.

Легирование epitаксиальных слоев GaInPSbAs проводили путем добавления в жидкую зону примеси: теллура (Te), дающего электронную проводимость и цинка (Zn) дырочную проводимость. Схематическое изображение выращенного ТФЭ-преобразователя приведено на рис. 3.

Определение несоответствия параметров решеток подложки и слоя, оценка кристаллического совершенства гетероструктур осуществлялись методом регистрации рентгеновской дифракции. Съемка кривых дифракционного отражения (КДО) рентгеновского излучения проводилась на высокоразрешающем рентгеновском дифрактометре ТРС-1 в двухкристальной геометрии с использованием медного излучения.

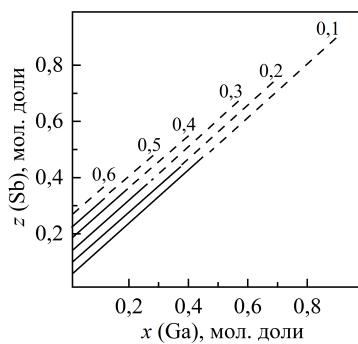


Рис. 1. Концентрационные зависимости изопериодических линий в гетероструктурах $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{Sb}_z\text{As}_{1-y-z}$ (InAs). Пунктиром обозначены области составов, подверженных спинодальному распаду; цифры на кривых, указывают содержание фосфора в твердой фазе (y)

Fig. 1. Concentration dependences of isoperiodic lines in $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{Sb}_z\text{As}_{1-y-z}$ (InAs) heterostructures. The dotted lines indicate the regions of compositions subject to spinodal decomposition; the numbers on the curves indicate the values of the phosphorus content in the solid phase (y)

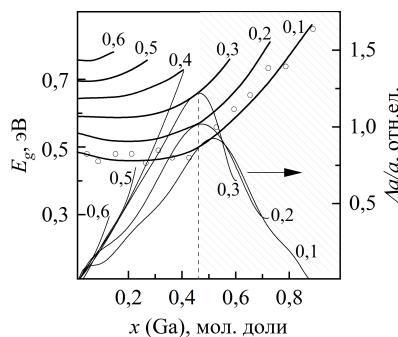


Рис. 2. Концентрационные зависимости ширины запрещенной зоны E_g и эффекта упорядочения $\Delta a/a$ $Ga_x In_{1-x} P_y Sb_z As_{1-y-z}$. Точками показаны экспериментальные данные; значения P (y) указаны на кривых

Fig. 2. Concentration dependences of the band gap E_g and the ordering effect $\Delta a/a$ of $Ga_x In_{1-x} P_y Sb_z As_{1-y-z}$. The dots show the experimental data; the P (y) values are indicated on the curves

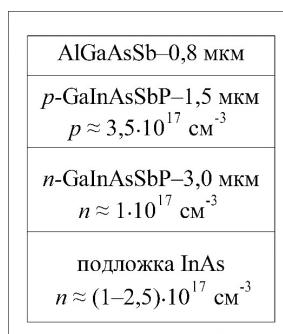


Рис. 3. Схематическое изображение термофотоэлектрического преобразователя n -InAs/ n -GaInPSbAs/ p -GaInPSbAs

Fig. 3. Schematic representation of n -InAs/ n -GaInPSbAs/ p -GaInPSbAs thermophotovoltaic converter

3. Результаты и их обсуждения

Исследование состава эпитаксиальных слоев GaInPSbAs(InAs) с помощью рентгеноспектрального микронализатора IXA-5 “Camebax” показало однородное распределение компонентов по толщине. Для анализа влияния дислокаций несоответствия были изготовлены два вида ТФЭП с различными активными слоями: изопериодным $Ga_{0,08} In_{0,92} P_{0,1} As_{0,85} Sb_{0,05}$ ($E_g \sim 0,5$ эВ) с плотностью дислокаций несоответствия $N_d \sim 7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ и неизопериодный $Ga_{0,2} In_{0,8} P_{0,5} As_{0,42} Sb_{0,08}$ ($E_g \sim 0,62$ эВ) с $N_d \sim 1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$. Создание широкозонного окна $Al_{0,5} Ga_{0,5} As_{0,04} Sb_{0,96}$ ($E_g \sim 1,5$ эВ) позволит уменьшить вероятность поверхностной рекомбинации.

Исследование спектральных характеристик ТФЭП представлены на рис. 4а, 4б. Следует заметить по данным рис. 4а, что все измеряемые величины: напряжение холостого хода U_{xx} и фактор заполнения FF , уменьшились с увеличением плотности дислокаций несоответствия с $7 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ во всем интервале изменений плотности фототока $0,05 \leq j \leq 5,0 \text{ A/cm}^2$. Использование изопериодических гетероструктур $Ga_{0,08} In_{0,92} P_{0,1} As_{0,85} Sb_{0,05}$ с плотностью дислокаций несоответствия $N_d \sim 7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ позволяет повысить внешний квантовый выход до 0,85 в спектральном диапазоне $0,5 \leq \lambda \leq 2,5 \text{ мкм}$ (рис. 4б).

Заключение

Методом ЗПГТ выращены гетероструктуры n -InAs/ n -GaInPSbAs/ p -GaInPSbAs для термофотоэлектрических преобразователей, работающих в спектральном диапазоне $0,5 \leq \lambda \leq 2,5 \text{ мкм}$.

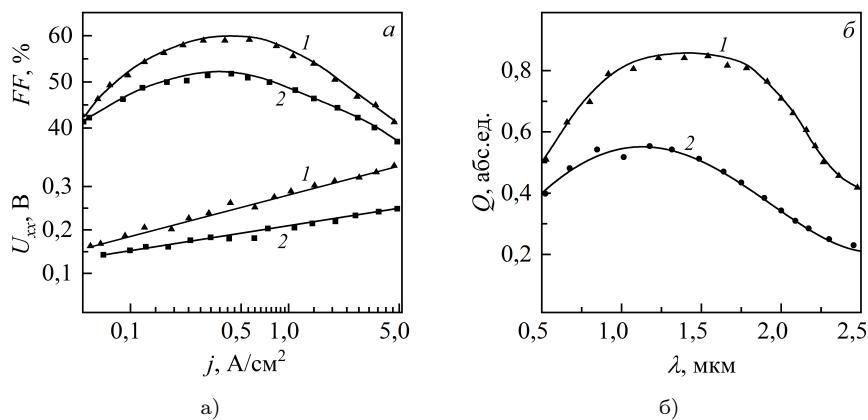


Рис. 4. а) Зависимость напряжения холостого хода U_{xx} и фактора заполнения FF нагрузочной характеристики от плотности тока j ТФЭП; б) Внешний квантовый выход гетероструктур:
1 — $\text{Ga}_{0,08}\text{In}_{0,92}\text{P}_{0,1}\text{As}_{0,85}\text{Sb}_{0,05}/\text{InAs}$; 2 — $\text{Ga}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{P}_{0,5}\text{As}_{0,42}\text{Sb}_{0,08}/\text{InAs}$

Fig. 4. a) Dependence of the open-circuit voltage U_{xx} and the fill factor FF of the load characteristic on the current density of the thermophotoelectric converter; б) External quantum yield heterostructures:
1 — $\text{Ga}_{0,08}\text{In}_{0,92}\text{P}_{0,1}\text{As}_{0,85}\text{Sb}_{0,05}/\text{InAs}$; 2 — $\text{Ga}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{P}_{0,5}\text{As}_{0,42}\text{Sb}_{0,08}/\text{InAs}$

Исследования фотоэлектрических характеристик показали значительную зависимость напряжения холостого хода U_{xx} и фактора заполнения FF от согласования постоянных решеток между эпитаксиальным слоем GaInPSbAs и подложкой InAs . С ростом степени рас согласования по параметрам решеток слой—подложка увеличивается плотность дислокаций с $N_d \sim 7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ и уменьшается U_{xx} с 0,35 В, FF с 60 % для изопериодной гетероструктуры $\text{Ga}_{0,08}\text{In}_{0,92}\text{P}_{0,1}\text{As}_{0,85}\text{Sb}_{0,05}/\text{InAs}$ до $N_d \sim 1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$, $U_{xx} = 0,25 \text{ В}$, $FF = 50 \%$ для неизопериодной гетеросистемы $\text{Ga}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{P}_{0,5}\text{As}_{0,42}\text{Sb}_{0,08}/\text{InAs}$.

Литература [References]

1. Andreev, V.M., Khvostikov, V.P., Larionov, V.R., Rumyantsev, V.D., Sorokina, S.V., Shvarts, M.Z., Vasil'ev, V.I., Vlasov, A.S., Tandem $\text{GaSb}/\text{InGaAsSb}$ thermophotovoltaic cells. *Proc. of the 1997 IEEE 26th Photovoltaic Specialists Conference*, 1997, pp. 935–938. URL: https://www.academia.edu/51362352/Tandem_GaSb_InGaAsSb_thermophotovoltaic_cells
2. Ferrari, C., Melino, S., Pinelli, M., Spina, P.R., Venturini, M., Overview and status of thermophotovoltaic systems. *Energy Procedia*, 2014, vol. 45, pp. 160–169. DOI: [10.1016/j.egypro.2014.01.018](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.018)
3. Krishtopenko, S.S., Ruffenach, S., Gonzalez-Posada, F., Boissier, G., Marcinkiewicz, M., Fadeev, M.A., Kadykov, A.M., Rumyantsev, V.V., Morozov, S.V., Gavrilenko, V.I., Consejo, C., Desrat, W., Jouault, B., Knap, W., Tournié, E., Teppe, F., Temperature-dependent terahertz spectroscopy of inverted-band three-layer $\text{InAs}/\text{GaSb}/\text{InAs}$ quantum well. *Phys. Rev. B*, 2018, vol. 97, no. 24, pp. 245419-1–245419-8. DOI: [10.1103/PhysRevB.97.245419](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.245419)
4. Алфимова, Д.Л., Лунин, Л.С., Лунина, М.Л., Выращивание и свойства твердых растворов $\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{P}_z\text{As}_{1-x-z}\text{Bi}_x$ на подложках GaP . *Неорганические материалы*, 2014, т. 50, №2, с. 127–133. [Alfimova, D.L., Lunin, L.S., Lunina, M.L., Growth and properties of $\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{P}_z\text{As}_{1-x-z}\text{Bi}_x$ solid solutions on GaP substrates. *Inorganic Materials*, 2014, vol. 50, no. 2, pp. 113–119. (in Russian) DOI: [10.1134/S0020168514020010](https://doi.org/10.1134/S0020168514020010)] DOI: [10.7868/s0002337x14020018](https://doi.org/10.7868/s0002337x14020018)
5. Лозовский, В.Н., Лунин, Л.С., Аскарян, Т.А., Метод расчета изопараметрических составов и ширины запрещенной зоны в пятикомпонентных твердых растворах на основе соединений A^3B^5 . *Изв. вузов. Сер. физ.*, 1989, т. 32, №7, с. 41–47. [Lozovsky, V.N., Lunin, L.S., Askaryan, T.A., Method for calculating isoparametric compositions and band gap widths in five-component solid solutions based on A^3B^5 compounds. *Izvestiya vuzov. Seriya fizika = Soviet Physics Journal*, 1989, vol. 32, no. 7, pp. 41–47. (in Russian)]
6. Лозовский, В.Н., Лунин, Л.С., *Пятикомпонентные твердые растворы соединений AlPBV (новые материалы оптоэлектроники)*. СКНЦ ВШ, Ростов-на-Дону, 1992. [Lozovsky, V.N., Lunin, L.S.,

- Pyatikomponentnye tverdye rastvory soedinenij AIIIBV (novye materialy optoelektroniki) = Five-component solid solutions of III-V compounds.* Rostov-on-Don, SKNC VSh, 1992. (in Russian)]
7. Дейбук, В.Г., Термодинамическая устойчивость эпитаксиальных пленок GaInSb, InAsSb, GaInP. *Физика и техника полупроводников*, 2003, т. 37, № 10, с. 1179–1183. [Deybuk, V.G., Thermodynamic stability of epitaxial films GaInSb, InAsSb, GaInP. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2003, vol. 37, iss. 10, pp. 1179–1183. (in Russian)]