07

Фотоэлектрические преобразователи террасированного типа на основе GaSb

© С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, А.С. Власов, В.П. Хвостиков

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: svsorokina@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 21 марта 2025 г.
В окончательной редакции 16 апреля 2025 г.
Принято к публикации 16 апреля 2025 г.

Апробирована концепция террасированных фотоэлектрических модулей на основе GaSb. Отработаны режимы изготовления и монтажа преобразователей размером 4×4 mm и собран тестовый модуль с последовательно-параллельной (2×2) схемой соединения образцов. Проведена оценка влияния материала и толщины керамических диэлектриков на перегрев преобразователей модуля.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, фотоэлектрический модуль, GaSb.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.14.60763.20321

Существует ряд задач, требующих объединения фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в модуль. Концепция террасированных модулей [1,2] была предложена и развита для ФЭП на основе Si. В этом случае чипы устанавливаются внахлест (рис. 1) по принципу укладки черепицы (shingling concept). За счет взаимного перекрытия ФЭП и отсутствия широких токопроводящих шин на приемной поверхности повышается фотоактивная площадь модуля, снижаются потери на затенение (вклад вносят лишь полосковые контакты), уменьшаются его габариты [3]. Представленная работа посвящена разработке и исследованию террасированных преобразователей на основе GaSb. Такая укладка позволит повысить плотность упаковки ФЭП в термофотоэлектрических генераторах [4–8] и в приемниках-преобразователях лазерного излучения для длины волны $\lambda \sim 1550$ nm [9,10], а объединение нескольких чипов в модуль поднимет выходное напряжение (что очень важно для узкозонных полупроводников).

Поскольку ФЭП предназначались для отработки общих принципов террасированной сборки, их получали по упрощенному технологическому циклу: одностадийной диффузией цинка в подложку GaSb n-типа [11] на глубину $\sim 0.9\,\mu$m. Использовались легированные теллуром подложки с $n \sim 3 \cdot 10^{17}\,\mathrm{cm}^{-3}$ и ориентацией (100) от ООО „Гирмет“ (Москва). На фронтальную поверхность ФЭП методом термического испарения в вакууме на установке ВУП-4 наносилось антиотражающее покрытие на основе $ZnS + MgF_2$. По разработанному комплекту фотошаблонов изготавливались преобразователи с общим размером 4×4 mm с широкой односторонней токосборной шиной и эквидистантной контактной сеткой (шаг $332\,\mu$m). На рис. 1 слева показан вид освещаемой поверхности преобразователя. Ширина периферийной шины, обеспечивающей нахлест ФЭП при террасированном монтаже, составляла 1 mm, а ее площадь — треть от светочувствительной поверхности образца. Относительно небольшой размер фотоэлектрического преобразователя выбран для экономии материалов в процессе исследований (определения выигрышной топологии контактной сетки и геометрии образцов, отработки режимов коммутации в модуль).

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) изготовленного террасированного преобразователя регистрировалась под импульсной засветкой ксеноновой лампы-вспышки. Образцы показывали ток короткого замыкания 0.26 A и напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.47$ V.

Отработаны режимы пайки как отдельных террасированных ФЭП, так и модулей на их основе. Использовалась паяльная паста NC257-2 на основе сплава Sn42Bi58 с температурой плавления 138 °C. Основные требования к пасте: низкая температура формирования паяного соединения, малое время оплавления и достаточная для предотвращения затеканий на боковой поверхности преобразователей вязкость. В противном случае возрастают токи утечки вплоть до короткого замыкания ФЭП. Для предотвращения затекания паяльной пасты возможно дополнительное нанесение специальной полимерной краски или другого защитного покрытия на торец нижнего преобразователя (рис. 1). Применялся одностадийный (без повторного нагрева) монтаж всех образцов в модуль для отказа от паяльных паст с разной температурой плавления и снижения риска деградации ФЭП.

Последовательное соединение достигалось взаимным перекрытием тыльного контакта верхнего ФЭП с фронтальной шиной нижнего образца (рис. 2, a), параллельное соединение элементов — за счет размещения преобразователей в соседних рядах (рис. 2, b). Для обеспечения равенства генерируемых фототоков (при последовательном монтаже) и напряжений (при параллельной коммутации) подбирались ФЭП с наименьшим рассогласованием фотоэлектрических параметров. Монтаж преобразователей проводился с использовани-

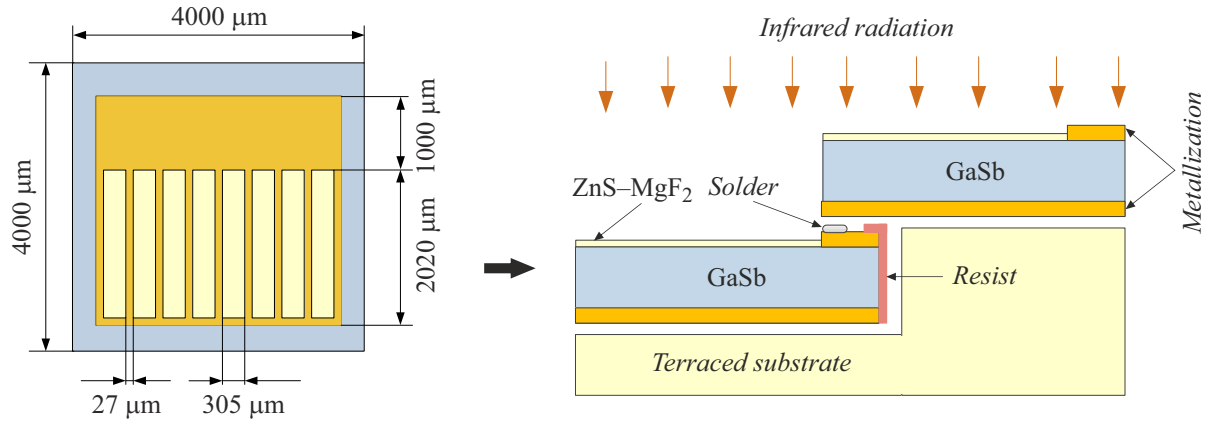


Рис. 1. Соединение двух фотоэлектрических преобразователей за счет перекрытия. На детализации слева — вид освещаемой поверхности ФЭП.

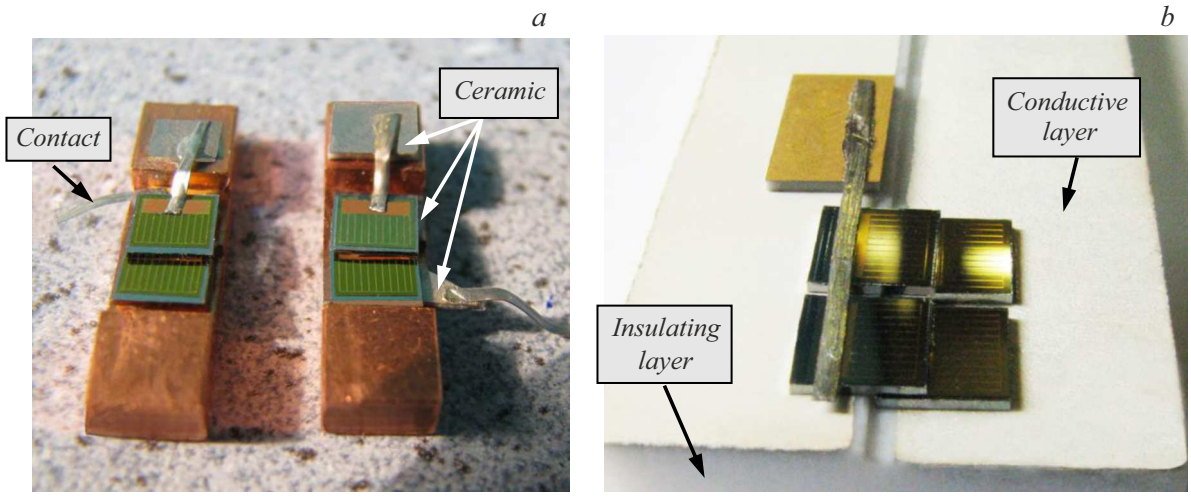


Рис. 2. Соединение преобразователей с односторонней токоотводящей шиной в фотоэлектрический модуль с использованием медного ступенчатого основания (a) и двухуровневой керамической теплоотводящей подложки (b).

ем ступенчатого теплоотводящего основания из меди (рис. 2, a). Для достижения электрической изоляции применялась керамика Al_2O_3 или BeO. Выбор Al_2O_3 обусловлен распространенностью и простотой технологии получения материала, его низкой стоимостью и согласованностью по температурному коэффициенту линейного расширения с GaSb ($6.1 \cdot 10^{-6}\,K^{-1}$). Применение BeO связано со значительной для керамических материалов теплопроводностью. Альтернативный вариант монтажа — с использованием двухуровневой стеклокерамической подложки MACOR (рис. 2, b). Этот беспористый материал на основе фторфлогопитовой слюды и боросиликатного стекла высоко технологичен, хорошо обрабатывается под любую форму и не деформируется при нагреве [12], поэтому удобен для формирования террасированного профиля. Недостаток керамики MACOR — низкая теплопроводность. Физические характеристики используемых в работе материалов суммированы в табл. 1.

Малый размер разработанных ФЭП позволил минимизировать механические напряжения при нагреве и охлаждении, возникающие из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения MACOR и GaSb. Ранее в работе [13] сообщалось об отсутствии механических напряжений при пайке террасированных GaSb-преобразователей на керамику AlN с коэффициентом теплового расширения $(3.6–4.7) \cdot 10^{-6}\,°C^{-1}$ для диапазона 25–70 °C — рабочих температур фотоэлементов в термофотоэлектрической системе. В свою очередь для кремниевых солнечных элементов, которые традиционно имеют существенно бóльшие размеры, концепция террасированных ФЭП несет повышенные риски даже для совместимых по температурному коэффициенту линейного расширения керамических подложек.

Облучение мощным лазерным излучением или эксплуатация в термофотоэлектрических генераторах с нагретым до высоких температур эмиттером могут вызывать нагрев ФЭП, иногда значительный. Подбор изоли-

Таблица 1. Характеристики материала основания или керамической подложки

Характеристика	Cu	Al_2O_3	BeO	MACOR
Плотность, g/cm^3	8.89	3.89	2.85	2.52
Прочность на изгиб, MPa	400*	310–450	170–190	≥ 94
Температурный коэффициент линейного расширения, $10^{-6}\,^\circ C^{-1}$ ($\Delta T = 20-400\,^\circ C$)	16.9–18.1	6.7–7.3	7.2–8.0	9
Теплопроводность, W/m·K	385	14–29	240–260	1.46
Удельное объемное сопротивление, $\Omega \cdot$ cm (25 °C)	$1.7\cdot10^{-6}$	10^{14}	10^{14}	10^{17}
Удельное объемное сопротивление, $\Omega \cdot$ cm (300 °C)		$> 10^{12}$	$> 10^{11}$	10^9

* Прочность на растяжение.

рующих, несущих и теплоотводящих материалов позволяет предотвратить ненужные потери и неблагоприятное сочетание компонентов модуля. Влияние керамических диэлектриков и их толщины на перегрев преобразователя ΔT определялось по изменению ВАХ относительно аналогичной зависимости для импульсной засветки ксеноновой лампой (в последнем случае температура на образце составляет $T \sim 25\,^\circ C$). Результаты получены в предположении линейного падения V_{oc} с ростом температуры со скоростью $\Delta V_{oc}/\Delta T = 1.5\,\text{mV}/^\circ\text{C}$ [14]. Напаянный на медное основание образец устанавливался на керамическую подложку и далее на теплоотвод с проточным водяным охлаждением. Для улучшения теплопередачи между соприкасающимися поверхностями (медное основание/керамика и керамика/теплоотвод) наносилась термопаста. Применение медной подложки и термопасты вместо припоя позволило исследовать один и тот же фотоэлектрический преобразователь с набором разных керамических подложек. Медь (помимо смены керамических материалов) обеспечивала быстрое и равномерное распределение тепла. Источником излучения служил нагретый до $T \sim 1000-1600\,^\circ C$ плоский инфракрасный эмиттер из карбида кремния, удаленный от ФЭП на 4–5 mm. Экспериментальные значения ΔT в табл. 2 приведены для плотности фототока короткого замыкания J_{sc} от 1 до 6 A/cm^2. В сильноточном режиме работы преобразователя перегрев не превышает $\sim 25\,^\circ C$ и практически не зависит от материала используемой керамической подложки. При малых токах (1 A/cm^2) разброс ΔT между Al_2O_3 и BeO сокращается до десятых градуса. В этой связи применение оксида бериллия становится нецелесообразным и должно быть ограничено в силу его токсичности. Двукратное повышение толщины Al_2O_3 (от 0.5 до 1 mm) также обеспечивало беспрепятственный отвод тепла.

MACOR имеет наименьшую теплопроводность, что значительно ограничивает применение керамики при пассивном охлаждении модуля. Проточное водяное охлаждение и использование тонких подложек снижает перегрев преобразователя, предотвращает потери выходной мощности и преждевременную деградацию модуля. Оценка с экстраполяцией экспериментальных данных показывает, что в сильноточном режиме работы подложки MACOR толщиной 0.5, 1.0 и 1.5 mm повышают

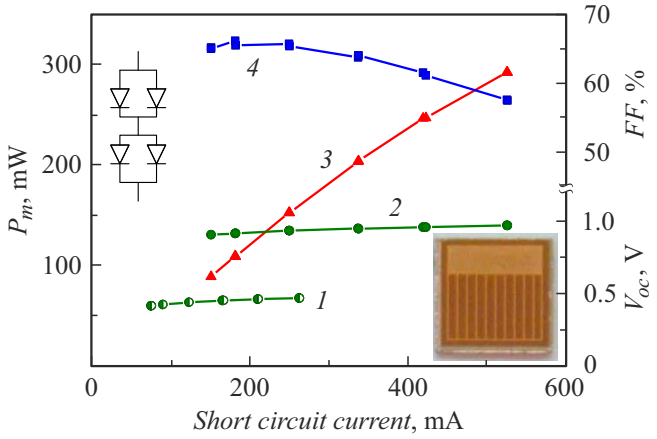


Рис. 3. Электрические параметры преобразователя размером 4×4 mm (кривая *1*) и модуля (кривые *2–4*) террасированного типа с керамическим основанием. *1*, *2* — напряжение холостого хода (V_{oc}), *3* — мощность в точке оптимальной нагрузки P_m, *4* — коэффициент заполнения ВАХ (FF). На вставках — способ коммутации ФЭП в модуле и фотография изготовленного преобразователя.

температуру ФЭП на $\Delta T = 35$, 45 и 67 °C соответственно. С учетом малой прочности на изгиб, необходимости формирования ступеньки под террасированную сборку и обеспечения удовлетворительных тепловых характеристик рекомендуемая толщина керамических оснований MACOR составляет 1 mm. Предшествующие исследования показали, что при напылении температурно-стабильных контактов нагрев ФЭП на основе GaSb до $T \sim 80\,^\circ C$ не является критичным [15].

С использованием shingling-концепции по последовательно-параллельной схеме (см. вставку на рис. 3) собран и протестирован прототип модуля из четырех фотоэлектрических преобразователей. Модуль изготовлен для поиска оптимальных конструкторских решений и оценки допустимости применения керамики MACOR. ФЭП устанавливались на керамическое основание с верхним проводящим слоем (рис. 2, *b*). При толщине преобразователей $\sim 450\,\mu$m высота ступеньки террасированной подложки составляла $\sim 500\,\mu$m. Зависимость параметров изготовленного модуля от тока короткого

Таблица 2. Перегрев ФЭП при использовании разных оснований

Материал основания	$J_{sc} = 1$ A/cm^2		$J_{sc} = 5$ A/cm^2		$J_{sc} = 6$ A/cm^2	
	ΔV_{oc}, mV	ΔT, °C	ΔV_{oc}, mV	ΔT, °C	ΔV_{oc}, mV	ΔT, °C
Медь	10.5	7.0	24.1	16.1	27.0	18
Медь + BeO (0.5 mm)	12.8	8.5	29.5	19.7	32.4	21.3
Медь + Al_2O_3 (0.5 mm)	13.0	8.7	29.8	19.9	34.1	22.7
Медь + Al_2O_3 (1.0 mm)	15.6	10.4	33.2	22.1	36.9	24.6
MACOR (0.5 mm)						35*
MACOR (1.0 mm)						45*
MACOR (1.5 mm)						67*

* Оценка с экстраполяцией экспериментальных данных.

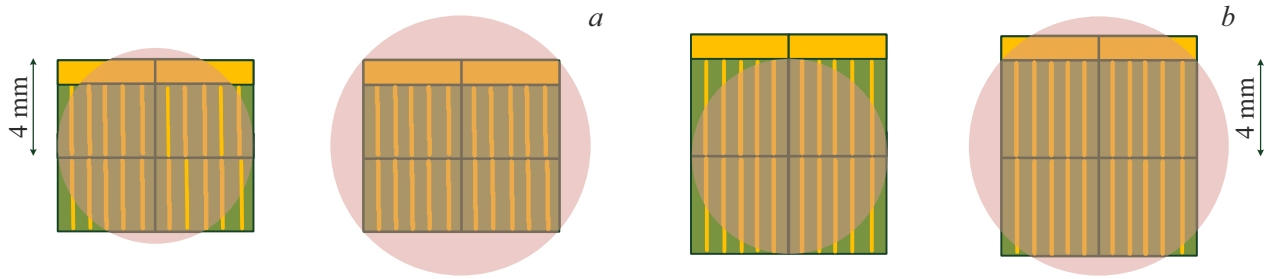


Рис. 4. Потери при облучении модуля ФЭП разной геометрии. *a* — используемая геометрия (квадратные ФЭП с прямоугольной светочувствительной поверхностью); *b* — запланированная геометрия (прямоугольные ФЭП с квадратной светочувствительной поверхностью).

замыкания под засветкой ксеноновой лампой-вспышкой (продолжительность импульса 1 ms) представлена на рис. 3 (кривые *2–4*). Измерения ВАХ проводились в течение одного светового импульса. Варьирование расстояния от лампы до ФЭП давало возможность исследовать поведение ВАХ в широком диапазоне освещенностей. При токе 0.5 A мощность модуля в точке оптимальной нагрузки P_m достигала ~ 300 mW.

В реальном фотоэлектрическом модуле количество преобразователей будет увеличено, что позволит повысить выходное напряжение и снизить коэффициент затенения. Исследования показали, что требуется изменить общую геометрию ФЭП с квадратной на прямоугольную (рис. 4). Удлинение элементов и равносторонняя светочувствительная поверхность модуля уменьшат оптические потери при засветке лучом с круговым распределением интенсивности и в первую очередь потери на выход излучения за пределы модуля, вносящие преобладающий вклад по сравнению с потерями на неполную засветку [16]. На рис. 4 показаны два варианта облучения модулей: сфокусированным и расфокусированным лазерным лучом. В обоих случаях измененный вариант геометрии оказывается предпочтительным.

Таким образом, в работе определены общие подходы к созданию многоэлементных террасированных модулей на основе GaSb, определены пути их усовершенствования. Показана целесообразность применения двухуровневых керамических подложек MACOR исходя из их малого веса, возможности механической обработки с жесткими допусками, удовлетворительных тепловых (в условиях водяного охлаждения модуля) и изоляционных характеристик.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20018 (https://rscf.ru/project/24-29-20018/) и гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 24-29-20018.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] H. Jee, S. Lee, C. Jeong, J. Lee, J. Nanosci. Nanotechnol., **19** (3), 1360 (2019). DOI: 10.1166/jnn.2019.16200
[2] J.-S. Park, W.J. Oh, J.-H. Joo, J.-S. Yi, B.-Y. Hong, J.-H. Lee, J. Nanosci. Nanotechnol., **20** (11), 6996 (2020). DOI: 10.1166/jnn.2020.18837
[3] M. Mittag, T. Zech, M. Wiese, D. Bläsi, M. Ebert, H. Wirth, in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC)* (IEEE, 2017), p. 1531. DOI: 10.1109/PVSC.2017.8366260
[4] V.P. Khvostikov. Ya.V. Grachev, A.S. Vlasov, O.A. Khvostikova, S.V. Sorokina, J. Power Sources, **501**, 229972 (2021). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229972

[5] V. Stelmakh, W.R. Chan, M. Ghebrebrhan, J. Senkevich, J.D. Joannopoulos, M. Soljačić, I. Celanović, IEEE Trans. Nanotechnol., **15** (2), 303 (2016). DOI: 10.1109/TNANO.2016.2522423
[6] T. Burger, C. Sempere, B. Roy-Layinde, A. Lenert, Joule, **4** (8), 1660 (2020). DOI: 10.1016/j.joule.2020.06.021
[7] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, М.В. Нахимович, М.З. Шварц, ФТП, **55** (10), 955 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.10.51454.9686 [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts, Semiconductors, **55** (11), 840 (2021). DOI: 10.1134/S1063782621100134].
[8] S. Chen, Y. Guo, Q. Pan, Y. Shuai, Int. J. Extrem. Manuf., **6**, 022009 (2024). DOI: 10.1088/2631-7990/ad1dca
[9] L.M. Fraas, M. O'Neill, in *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC)* (IEEE, 2020), p. 0337. DOI: 10.1109/PVSC45281.2020.9300792
[10] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Ф.Ю. Солдатенков, Н.Х. Тимошина, ФТП, **49** (8), 1104 (2015). http://journals.ioffe.ru/articles/42093 [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, F.Yu. Soldatenkov, N.Kh. Timoshina, Semiconductors, **49** (8), 1079 (2015). DOI: 10.1134/S1063782615080114].
[11] S.V. Sorokina, V.P. Khvostikov, M.Z. Shvarts, in *Proc. 13th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition* (Nice, France, 1995), p. 61.
[12] *Corning Incorporated* [Электронный ресурс]. https://www.corning.com/emea/en/products/advanced-optics/product-materials/specialty-glass-and-glass-ceramics/glass-ceramics/macor.html
[13] T. Schlegl, F. Dimroth, A. Olm, A.W. Bett, AIP Conf. Proc., **738**, 285 (2004). DOI: 10.1063/1.1841905
[14] A.W. Bett, S. Keser, G. Stollwerck, O.V. Sulima, W. Wetting, in *Conf. Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conf. – 1996* (IEEE, 1996), p. 133. DOI: 10.1109/PVSC.1996.563965
[15] S.V. Sorokina, F.Yu. Soldatenkov, N.S. Potapovich, M.Z. Shvarts, V.P. Khvostikov, IEEE Electron. Device Lett., **43** (3), 418 (2022). DOI: 10.1109/LED.2022.3148432
[16] J. Zhang, S. Wu, J. Liu, W. Huang, L. Ling, Q. Meng, R. Zhang, L. Chen, J. Zhang, Z. Wang, T. Li, Mater. Res. Express, **12**, 025902 (2025). DOI: 10.1088/2053-1591/adaac5