07

Фотоэлектрический модуль террасированного типа на основе GaSb

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: svsorokina@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 8 июля 2025 г.
В окончательной редакции 25 ноября 2025 г.
Принято к публикации 29 января 2025 г.

Разработаны преобразователи террасированного типа на основе GaSb, позволяющие увеличить площадь фотоактивной поверхности принимающего ИК-излучение модуля. На образцах размером 8.7×9 mm при засветке импульсной ксеноновой лампой и токе 3 A получено напряжение холостого хода $V_{oc} = 0.49$ V. Проведена оценка возможности одностадийного (без повторного нагрева) монтажа образцов в модуль с последовательно-параллельной (2×2) схемой соединения. Рассмотрены общие принципы сборки модуля террасированного типа, и смонтирован тестовый экземпляр из четырех преобразователей с напряжением $V_{oc} = 0.94$ V и мощностью $P_m = 1.45$ W при плотности тока 2 A/cm^2.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, фотоэлектрический модуль, GaSb.

DOI: 10.61011/JTF.2026.06.63005.171-25

Введение

В последние годы большая часть рынка солнечных элементов приходится на кристаллический кремний. Ряд исследований сосредоточен на повышении эффективности таких фотоэлектрических модулей за счет террасированной укладки преобразователей (shingled array [1–6]). Модули террасированного типа характеризуются высоким отношением активной площади к общей площади фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Токопроводящая шина нижних ФЭП модуля закрывается активной областью верхних фотоэлементов (по принципу укладки черепицы), что сокращает потери на затенение. Настоящая работа рассматривает перенос концепции кремниевых террасированных модулей на антимонид галлия. Фотоэлектрические модули на основе GaSb нашли применение в преобразовании инфракрасного излучения нагретых тел [7–9] и лазерного излучения [10,11]. Для GaSb и термофотоэлектрического способа преобразования энергии shingled-концепция была успешно апробирована ранее JX Crystals [7].

Преобразователи лазерного излучения сегодня используются в системах дистанционного энергопитания, потребность в которых огромна благодаря широчайшему спектру применений. Дистанционные технологии важны в повседневной жизни и народно-хозяйственной деятельности при подзарядке аппаратуры [12,13], роботов и БПЛА [12,14,15], питании подводных датчиков [12,16,17], электроприводов [18] и аэростатов [19], в качестве альтернативы кабельным сетям в труднодоступных районах, взрыво- и пожароопасные производствах, сложных для человека зонах. Удаленное энергоснабжение востребовано в медицине, транспортной, военной [15], космической [12] сферах, специализированных системах инфо- и телекоммуникации [19]. В настоящее время активно развивается два независимых направления, различающихся передающей средой — беспроводная передача энергии по открытому каналу (PoA/V, [13–15]) и энергопитание по оптическим волокнам (PoF, [20,21]). Потенциально лазерное энергопитание способно обеспечить мощность $\sim$ MW [12] и дистанцию источник–приемник $\sim 10^3$ km [12]. Повышение дальности передачи требует малого затухания оптического сигнала, поэтому среди доступных коммерческих лазеров особый интерес представляет „телекоммуникационная“ длина волны $\lambda = 1550$ nm [7,19,21] с незначительными ослаблениями излучения как в атмосфере, так и в оптоволокне и с возможностью усиления сигнала оптическими усилителями. Практическая реализуемость систем дистанционного питания значительно отстает от востребованности. Определенную роль в этом играет отсутствие ключевых элементов — дешевых и эффективных фотоприемных модулей. Особенности передачи лазерного излучения с $\lambda = 1550$ nm через атмосферу / по оптоволокну и влияние погодных условий на потери в системе рассмотрены в [19].

1. Конструктивные и технологические особенности ФЭП

ФЭП террасированного типа изготовлены методом диффузии цинка из газовой фазы в подложку n-GaSb. Применялся традиционный для ФТИ им. А.Ф. Иоффе двухстадийный вариант диффузии — с формированием мелкого p-эмиттера на светочувствительной поверхности и углубленным $p-n$-переходом в подконтактных областях [22]. Внешний вид разработанного ФЭП размером 8.7×9 mm схематически показан на рис. 1, *a*. Площадь освещаемой поверхности S_{DIA} (designated illumination area [23]) составляет 0.675 cm^2. Токосборная шина, вынесенная на периметр образца,

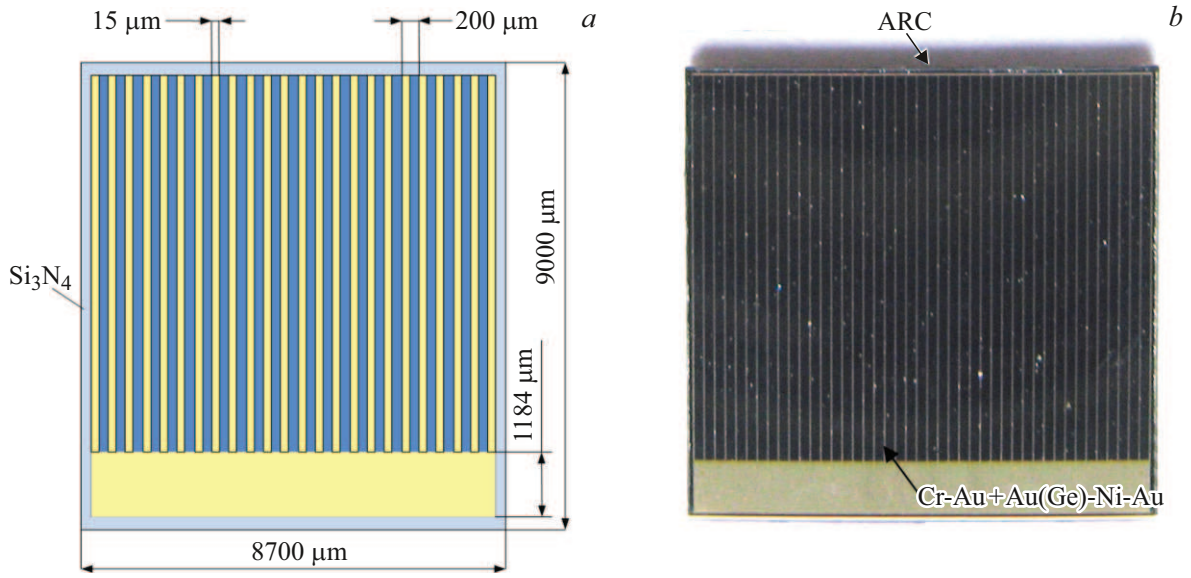


Рис. 1. Схема (a) и фотография (b) освещаемой поверхности изготовленного ФЭП террасированного типа.

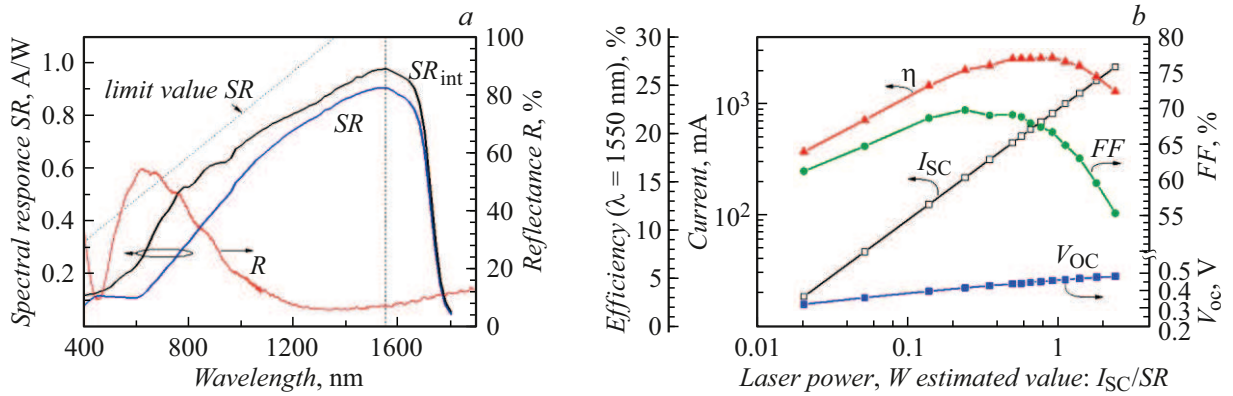


Рис. 2. Спектральная чувствительность (a) и выходные электрические характеристики (b) ФЭП террасированного типа под импульсной ксеноновой лампой.

расширена до ~ 1.2 mm для формирования перекрытия преобразователей при монтаже. Шаг контактной сетки, обеспечивающей низкое переходное сопротивление, составляет $200\,\mu$m, ширина центральных контактных полос — $15\,\mu$m. На фоточувствительную поверхность нанесено антиотражающее покрытие ARC (рис. 1, b) на основе Si_3N_4. По периферии ФЭП сформирована защитная рамка из Si_3N_4 — технологическая область без $p-n$-перехода. В качестве основного варианта фронтального контакта преобразователей использовались термически напыленные пленки Cr–Au с гальваническим наращиванием толщины до $1.5\,\mu$m последовательным осаждением Au, Ni, Au.

2. Выходные характеристики преобразователя

Преобразователи тестировались под излучением импульсной ксенононовой лампы. На рис. 2 приведены выходные электрические характеристики ФЭП. Спектральная чувствительность SR имеет максимум в области длин волн ~ 1550 nm. Исключив потери на отражение, можно оценить величину SR_{int}, показанную на рис. 2, a черной кривой. В дальнейшем снижение отражения R будет достигаться оптимизацией ARC и применением двухслойных покрытий. При плотности тока $1\,\mathrm{A/cm^2}$ значения фактора заполнения вольт-амперной характеристики FF и напряжения холостого хода V_{OC} составили соответственно 67.9 % и 0.46 V (рис. 2, b). Коэффициент полезного действия ФЭП η рассчитан для преобразования лазерного излучения с длиной волны 1500 nm по измеренному значению $SR = 0.903$ A/W.

3. Модуль на основе террасированных преобразователей

Использование разработанных фотоэлектрических преобразователей подразумевает их соединение в мо-

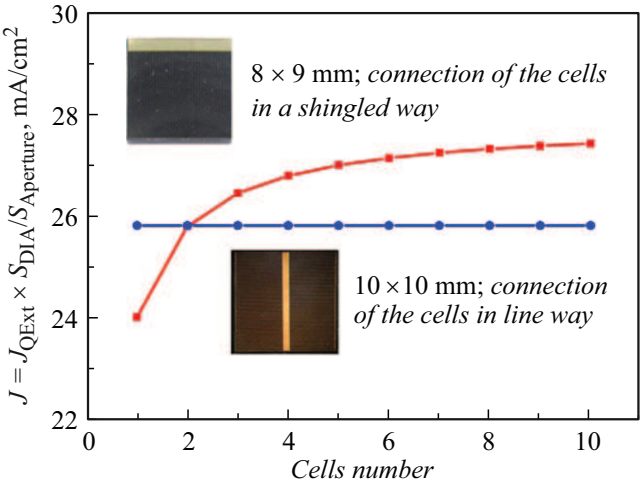


Рис. 3. Расчетные значения плотности фототока для разного количества преобразователей, объединенных в модуль террасированным и традиционным способом (S_{DIA} и $S_{Aperture}$ — активная и полная площадь преобразователя соответственно).

дуль для достижений требуемых значений тока и напряжения, многократно превышающих ток и напряжение единичного образца. Для оценки преимуществ shingled-концепции были измерены плотности фототока J_{QExt} на разработанных преобразователях (8×9 mm) и на фотоэлементах традиционного дизайна размером 10×10 mm, имеющих центральную токосборную шину и использованных ранее в термофотоэлектрических системах конического и цилиндрического типов [9]. Отбиралась пара с одинаковым антиотражающим покрытием, похожими спектральными характеристиками и наиболее близкими значениями J_{QExt} (27.87 и 27.47 mA/cm^2 соответственно, AM1.5D, LAOD, 1000 W/m^2). Рис. 3 показывает расчетные значения плотности фототока J для разного количества таких преобразователей, объединенных в модуль террасированным или традиционным („линейным“) способом. За счет уменьшения потерь на затенение контактной сеткой при равном количестве образцов значения фототока в первом случае превышают таковые для традиционных аналогов. Таким образом, многоэлементная террасированная панель будет значительно более компактной и более эффективной по занимаемой образцами площади, чем „линейная“.

Монтаж преобразователей выполнялся с применением паяльной пасты на основе висмута. Важными условиями монтажа являются низкие рабочие температуры [9], сокращение времени прогрева и отсутствие затеканий паяльной пасты на торец преобразователей.

Коммутация ФЭП в тестовый модуль производилась по последовательно-параллельной схеме 2×2. Для обеспечения последовательного соединения образцы монтировались внахлест, с перекрытием краевых поверхностей преобразователей и прямым контактом токосборной шины нижнего фотоэлемента с тыльной металлизацией верхнего „соседа“. За счет отсутствия широких токосборных шин на принимающей излучение поверхности повышается фотоактивная площадь модуля и снижаются потери на затенение. Модуль собран как прототип для отработки основных принципов конструкции и монтажа. В зависимости от задачи в реальной фотоэлектрической панели количество преобразователей значительно увеличится за счет укладки бóльшего числа рядов и бóльшего числа последовательно соединенных цепочек образцов (рис. 4).

Пайка ФЭП в модуль проводилась с использованием бессвинцовой паяльной пасты с температурой плавления $T \sim 138\,^\circ$C. Особенность монтажа заключалась в необходимости пайки преобразователей (верхних и нижних образцов между собой, а также формировании рядов из чипов) и внешних выводов к ним одномоментно: повторный прогрев GaSb-фотоэлементов до температур плавления паяльной пасты вызывает появление утечек $p-n$-перехода. Кроме того, двухэтапный монтаж потребует применения паст с разной температурой плавления. Однако выбор пасты с $T < 138\,^\circ$C на второй этап монтажа нежелателен из-за опасности ее плавления в процессе эксплуатации модуля. Особенности двухэтапного монтажа террасированных германиевых преобразователей с использованием двух паяльных паст — 96.5Sn3.5Ag с температурой плавления $T = 210\,^\circ$C и Sn42Bi58, $T = 138\,^\circ$C — рассмотрены в [24]. Для формирования выводов использовалась медная луженая лента толщиной 0.1 mm (рис. 5). Одномоментный монтаж многоэлементной панели рекомендовано проводить с применением специальных зажимов и захватов, фиксирующих преобразователи и удерживающих конструкцию от сдвига до момента застывания паяльной пасты.

Возможный вариант монтажа террасированных модулей — с использованием токопроводящих адгезивов (electrical conductive adhesives — ECA, [5,25]) или клея с наполнителем на основе серебра [26]. Однако ECA на основе эпоксидных смол или силикона значительно уступают припоям в проводимости. Токопроводящий клей, в свою очередь, характеризуется низкой теплопроводностью и может затекать/мигрировать на $p-n$-переход преобразователя, что ухудшает тепловой контакт, вызывает короткое замы-

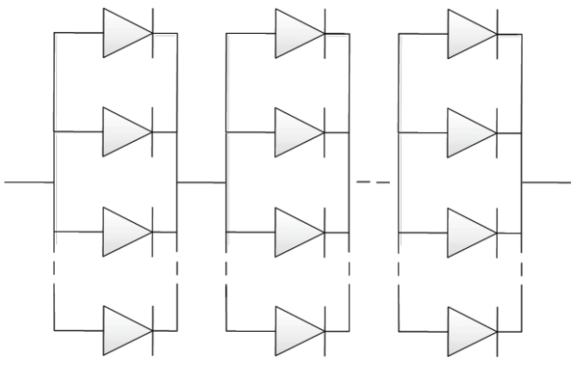


Рис. 4. Эквивалентная схема фотоэлементной панели с последовательно-параллельным соединением преобразователей.

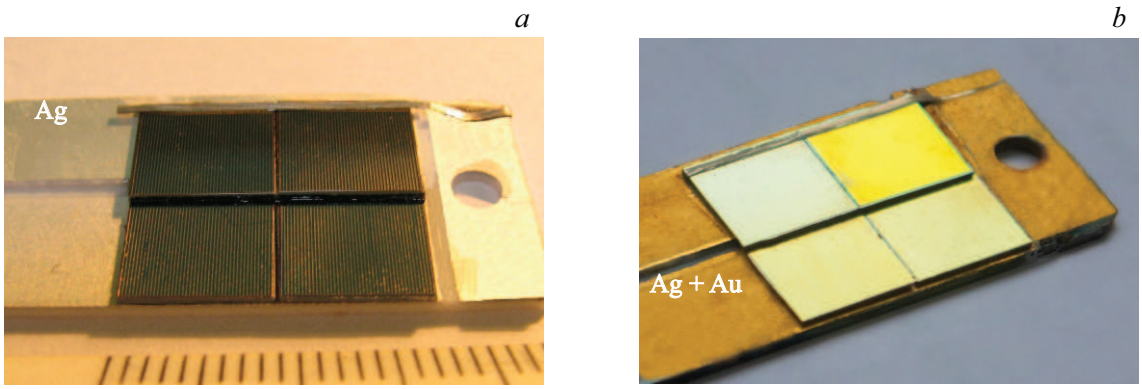


Рис. 5. Модуль террасированного типа на керамической подложке с проводящим слоем серебра (a) и с дополнительным слоем золота (b).

кание и требует применения защитного лака по периметру устанавливаемых образцов. Монтаж преобразователей на несущей теплоохлаждающей конструкции проводился с применением двухуровневой керамической подложки. За основу взята промышленная керамика MACOR [27] на основе фторфлогопитовой слюды и боросиликатного стекла со следующим составом, [wt.%]: $46SiO_2 \cdot 16Al_2O_3 \cdot 17MgO \cdot 10K_2O \cdot 7B_2O_3 \cdot 4F$. Керамика выгодно отличается своей технологичностью, легко обрабатывается под самую сложную форму, хорошо полируется. Ее недостатком является низкая ($1.46\,W/(m \cdot K)$) теплопроводность, что осложняет применение данных теплоотводящих подложек при пассивном охлаждении модуля. Тем не менее предварительные оценки показали незначительный перегрев ΔT ФЭП и допустимость использования MACOR при проточном водяном охлаждении. В этом случае даже в сильноточном режиме работы значения ΔT для подложек толщиной 0.5, 1.0 и $1.5\,\mu$m не превышают 5 °C, 45 °C и 67 °C соответственно [28]. Для обеспечения пайки и повышения электропроводности на керамическое основание наносился проводящий слой Ag или Ag+Au. Террасированные модули изготавливались на обоих вариантах подложек (рис. 5). Для изоляции посадочных мест при монтаже чипов в проводящем покрытии основания предусмотрен зазор шириной ~ 1 mm.

На рис. 6 приведены ВАХ модулей на керамических подложках с проводящими покрытиями как Ag (рис. 6, кривые *2*, *4*, *6*, *8*), так и Ag+Au (рис. 6, кривые *1*, *3*, *5*, *7*). Из сравнения зависимостей *5* и *6* следует, что при увеличении плотности тока коэффициент заполнения нагрузочной характеристики FF усовершенствованного модуля падает медленнее, чем исходного. Контакты, припаянные к серебряному проводящему слою, имеют более высокое сопротивление, чем контакты к золотому покрытию. Вероятно, это связано с окислением серебряного основания, особенно в условиях пайки при повышенной до ~ 150 °C температуре (на 30 °C выше температуры плавления паяльной пасты $T = 120$ °C). В целом дополнительный слой Au на керамическом основании упрощает пайку чипов. Различие в значениях V_{oc} может быть связано с разбросом характеристик установленных в модуль ФЭП. Максимальный зарегистрированный монохроматический ($\lambda = 1550$ nm) КПД составляет 24.9 %. При оптической мощности более 3 W становятся ощутимы резистивные потери, наблюдается значительное падение FF.

Пунктирными кривыми *7'* и *7"* на рис. 6, *b* показаны зависимости монохроматической эффективности усовершенствованного модуля при облучении лазерами с длинами волн 1470 и 1310 nm. Такие коммерческие источники излучения представлены в линейках разных производителей. Первый из них широко используется в медицине, второй — в волоконно-оптических линиях. Модуль эффективен при длине волны 1470 nm (КПД ~ 24.6 %), однако указанная λ не попадает в окна прозрачности атмосферы/оптоволокна и менее перспективна для лазерных трасс. В частности, при использовании стандартных многомодовых оптических волокон потери на длине волны 1470 nm определяются выражением $0.43x + 3.10$ и составят на дистанции 5 km 5.25 dB (против $0.16x + 0.18$ и 0.98 dB для $\lambda = 1550$ nm и одномодового волокна), где x — расстояние в километрах [21]. Системы PoF с $\lambda = 1310$ nm уступают по затуханию на расстоянии аналогам с $\lambda = 1550$ nm (0.3–0.4 dB/km по сравнению с 0.2–0.25 dB/km [29]), но характеризуются минимальным уширением передаваемого оптического импульса, т. е. нулевой дисперсией. Как и другие излучатели ближнего инфракрасного (780–1400 nm) диапазона, лазер с $\lambda = 1310$ nm может вызвать повреждение сетчатки глаз, что несколько снижает разнообразие его применений в технологиях PoA/V.

4. Применение, потенциал возможностей и пути дальнейшей оптимизации фотоэлектрического модуля

Изготовленный модуль ориентирован под прием лазерного излучения (рис. 7), но при подходящей геомет-

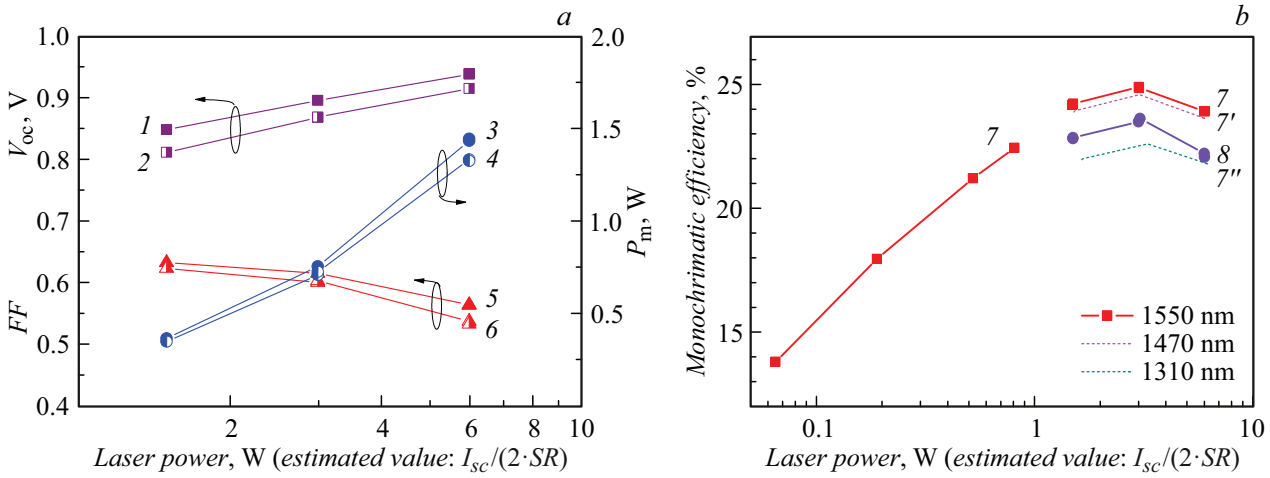


Рис. 6. Электрические характеристики модулей под засветкой импульсной ксеноновой лампой. *2*, *4*, *6*, *8* — керамика с проводящим слоем серебра; *1*, *3*, *5*, *7*, *7'*, *7"* — керамика с проводящим слоем Ag+Au. Пунктирные кривые — оценка эффективности при длине волны лазера 1470 и 1310 nm.

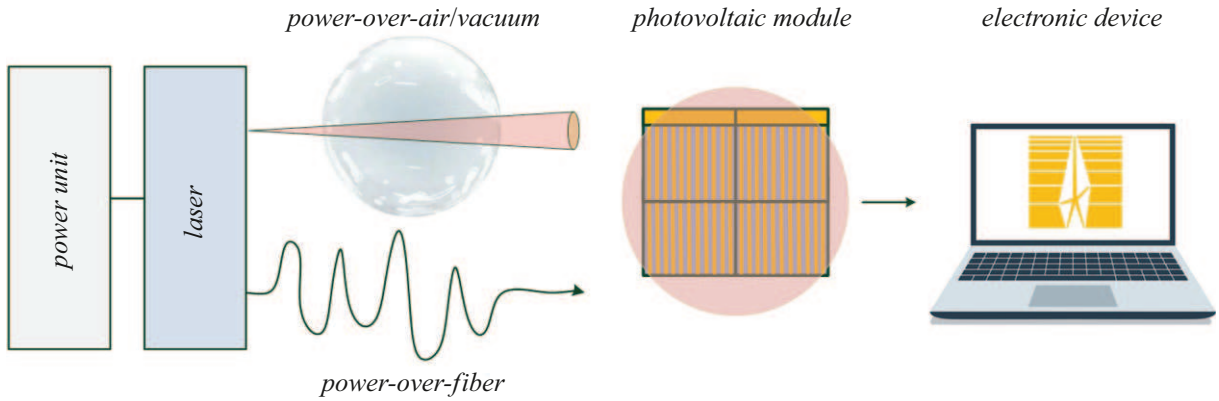


Рис. 7. Блок-схема передачи лазерной энергии удаленному потребителю через атмосферу/вакуум (технология PoA/V) или по оптоволокну (технология PoF).

рии может применяться и в термофотоэлектрических генераторах. По сравнению с разработанным ранее аналогом из малоразмерных ФЭП [28] значительно повышена выходная мощность ($P_m = 1.45$ W вместо 0.3 W). Увеличен размер ФЭП и, следовательно, пространственный охват лазерного луча. Общая площадь приемника составляет 1.74×1.68 cm при площади фоточувствительной поверхности 1.74×1.56 cm (рис. 8). В системах беспроводной передачи энергии по открытому каналу модуль может эффективно принимать лазерное излучение с $\lambda = 1550$ nm на близких расстояниях. При начальной апертуре 1–2 cm ширина луча на дистанции 50 m варьируется в диапазоне 2–2.5 cm (см. таблицу). Оценка выполнена на основании данных о расходимости луча работы [30].

Модуль собран как тестовый макет для стационарной (без перемещения источника или приемника) системы дистанционного энергопитания, демонстрации реализуемости заложенных в нее принципов и определения требований к конструкциям. Запланировано использование модуля в лабораторных экспериментах при полном, с выходом луча за пределы приемника, освещении (пунктир на рис. 8). Световое пятно, не совпадающее по форме с приемником, будет ориентироваться по центру фоточувствительной поверхности. Широкий лазерный луч, направленный на столь малую фотоприемную панель, упростит дистанционное наведение, компенсирует возможную неточность при отклонениях (что особо критично для сфокусированного излучения) и промоделирует эффективность модуля при облучении удаленным на бóльшие расстояния источником.

Увеличение числа ФЭП в панели не только повысит выходное напряжение и дистанцию лазер–приемник, но расширит диапазон возможных апертур лазера [30]

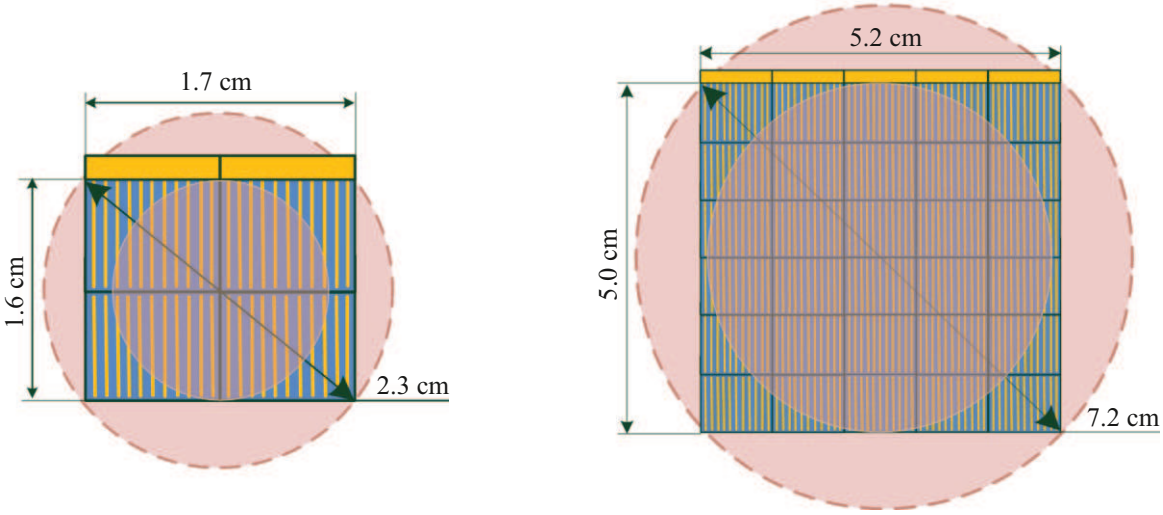


Рис. 8. Приемная поверхность модуля при облучении широким и узким лучами.

Ширина лазерного луча ($\lambda = 1550$ nm) при передаче энергии удаленному потребителю [30] для различных значений апертуры и дистанции до приемника

	Апертура, cm	Дистанция до приемника, m			
		50	100	200	500
Ширина луча, cm	1	2	3	4.8	8.5
	2	2.5	3	3.9	6.7
	3	3.4	3.6	4.3	6.1
	4	4.2	4.5	5.0	6.4
	5	5.2	5.4	5.7	6.9
	6	6.2	6.3	6.6	7.5
	7	7.1	7.2	7.5	8.3
	8	8.1	8.2	8.5	9.2
	9	9.1	9.2	9.4	10
	10	10.1	10.2	10.4	10.9

и ассортимент запитанных от модуля электронных устройств. Так, полноразмерная панель из тридцати аналогичных преобразователей (5×6 чипов, рис. 8) с близкой к квадрату фоточувствительной поверхностью будет эффективна при световом пятне диаметром 5–7.2 cm, например, при апертуре 7 cm и дистанции 100 m. Еще бóльшее повышение числа преобразователей в модуле усложнит его монтаж. В таком случае самый простой путь наращивания дистанции лазер–приемник — очередное повышение размера чипов. При этом сократятся и потери на зазоры между ФЭП.

В целом подбор оптимального режима облученности (рис. 7, 8) как тестового, так и многоэлементного модуля требует дополнительных исследований. Анализ литературы говорит о том, что единичный ФЭП при неполной засветке значительно эффективнее, чем при выходящем за его пределы лазерном луче [31]. Причем данная закономерность выполняется как для значительного (рис. 8, пунктир), так и небольшого (рис. 7) выхода луча за пределы активной поверхности. Однако в модуле неполная засветка ограничивает фотоэлектрическое преобразование соединенных по последовательно-параллельной схеме ФЭП. С учетом неравномерности лазерного луча при гауссовом распределении интенсивности угловые образцы полноразмерного модуля могут оказаться практически незасвеченными и резко ограничить ток. Поэтому при дальнейшем поиске оптимальных решений должны рассматриваться и вопросы снижения схемотехнических потерь. Другие пути оптимизации — опробование керамических материалов со значительно бóльшей теплопроводностью по сравнению с MACOR, в частности, керамики из нитрида алюминия (180–220 против ~ 1.5 W/mK). Для обеспечения равенства сторон фоточувствительной поверхности и удобства сборки модуля следует изменить геометрию ФЭП [28].

Заключение

Исследована возможность создания модуля терраси-рованного типа с использованием диффузионных ФЭП на основе GaSb и керамики MACOR. Для сборки из четырех ФЭП достигнута максимальная электрическая мощность 1.45 W. Определены условия монтажа, не приводящего к деградации преобразователей. Экспериментально подтверждено увеличение фототока терраси-рованного фотоэлектрического модуля по отношению к традиционному аналогу с линейной сборкой. Намечены пути дальнейшей оптимизации модуля применительно к беспроводной передаче энергии по атмосферному оптическому каналу. Оценен потенциал возможностей

модуля при увеличении числа ФЭП и изменении режима облучения.

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. Rabanal-Arabach, D. Rudolph, I. Ullmann, A. Halm, A. Schneider, T. Fischer. *Proc. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* (Amsterdam, Netherlands, 2017), DOI: 10.13140/RG.2.2.25535.82088

[3] J. Bae, H. Jee, Y. Park, J. Lee. Appl. Sci., **11** (23), 11257 (2021). DOI: 10.3390/app112311257

[4] J.-S. Park, W.-J. Oh, J.-H. Joo, J.-S. Yi, B.-Y. Hong, J.-H. Lee. J. Nanosc. Nanotechnol., **20** (11), 6996 (2020). DOI: 10.1166/jnn.2020.18837

[5] S. Chowdhury, E.-C. Cho, Y. Cho, Y. Kim, J. Yi. New Renewable Energy, **16** (3), 1 (2020). DOI: 10.7849/ksnre.2020.0009

[6] J. Shahid, A.Ö. Karabacak, M. Mittag. *Proc. 30th International Photovoltaic Science and Engineering Conference* (8–13 November 2020, Jeju, South Korea), DOI: 10.24406/publica-fhg-409606

[7] L.M. Fraas, M. O'Neill, Proc. 47th IEEE PVSC (Calgary, AB, Canada, 2020), p. 0337. DOI: 10.1109/PVSC45281.2020.9300792

[8] C. Algora, D. Martín. AIP Conf. Proceed., **653**, 452 (2003). DOI: 10.1063/1.1539400

[9] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, О.А. Хвостикова, А.В. Малевская, А.С. Власов, М.З. Шварц, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев. ФТП, **44** (2), 270 (2010). [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, O.A. Khvostikova, A.V. Malievskaya, A.S. Vlasov, M.Z. Shvarts, N.K. Timoshina, V.M. Andreev. Semiconductors, **44** (2), 255 (2010). DOI: 10.1134/S1063782610020223]

[10] V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova, N.S. Potapovich, A.V. Malevskaya, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts. *Proc. 15th Int. Conf. on Concentrator Photovoltaic Systems, CPV-15* (Fes, Morocco) [AIP Conf. Proceed., **2149**, 050007 (2019). DOI: 10.1063/1.5124192]

[11] 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]

[12] Y. Zheng, G. Zhang, Z. Huan, Y. Zhang, G. Yuan, Q. Li, G. Ding, Z. Lv, W. Ni, Y. Shao, X. Liu, J. Zu. Space Solar Power and Wireless Transmission, **1** (1), 17 (2024). DOI: 10.1016/j.sspwt.2023.12.001

[13] V. Iyer, E. Bayati, R. Nandakumar, A. Majumdar, S. Gollakota. *Proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, **l** (4), Article no. 143 (2018). DOI: 10.1145/3161163

[14] В.А. Богушевская, О.В. Заяц, Я.Н. Масляков, И.С. Мацак, А.А. Никонов, В.В. Савельев, А.А. Шептунов. Труды МАИ, **51** (2012). https://trudymai.ru/published.php?ID=29047

[15] T.J. Nugent, J.T. Karea. *Proc.Unmanned Systems Technology XIII* (Orlando, Florida, United States, 2011), DOI: 10.1117/12.886169

[16] P. Sanmartín, F. Almonacid, M.A. Ceballos, A. García-Loureiro, E.F. Fernandez. Solar Energy Mater. Solar Cells, **266**, 112662 (2024). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112662

[17] X. Guo, X. Chen, Q. Li, G. Zhang, G. Ding, F. Li, Y. Shi, Y. Zhang, H. Wang, Y. Zheng, Y. Shao. Energy Technol., **11**, 2300083 (2023). DOI: 10.1002/ente.202300083

[18] H. Liu, Y. Zhang, Y. Hu, Z. Tse, Jing wu. Power Electron. Drives, **6** (41), 167 (2021). DOI: 10.2478/pead-2021-0010

[19] I.A. Ali, D.P. Wilson, M.N. Beattie, R.H. Ogan, N. Rajaram, R. Cheriton, A. Atieh, K. Hinzer. *Proc. Free-Space Laser Communications XXXVI* (San Francisco, California, United States, 2024), 128771Q. DOI: 10.1117/12.3001939

[20] E.P. Putra, R. Theivindran, H. Hasnul, H.J. Lee, P.J. Ker, M.D.Z. Jamaludin, R. Awang, F.A.M. Yusof. J. Photon. Energy, **13** (1), 011001 (2023). DOI: 10.1117/1.JPE.13.011001

[21] S. Fafard, D. Masson. Photonics, **11** (7), 596 (2024). DOI: 10.3390/photonics11070596

[22] В.М. Андреев, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. ФТП, **43** (5), 695 (2009). [V.M. Andreev, S.V. Sorokina, N.Kh. Timoshina, V.P. Khvostikov, M.Z. Shvarts. Semiconductors, **43** (5), 668 (2009). DOI: 10.1134/S1063782609050236]

[23] M.A. Green, E.D. Dunlop, G. Siefer, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, X. Hao. Prog Photovolt Res. Appl., **31**, 3 (2023). DOI: 10.1002/pip.3646

[24] A. Datas, C. Algora. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, **21** (5), 1025 (2013). DOI: 10.1002/pip.2201

[25] G. Beaucarne. Energy Proced., **98**, 115 (2016). DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.087

[26] T. Schlegl, F. Dimroth, A. Olm, A.W. Bett. Proc. 6th Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity, **738**, 285 (2004). DOI: 10.1063/1.1841905

[27] Электронный ресурс. Corning Incorporated Режим доступа: https://www.corning.com/emea/en/products/advanced-optics/product-materials/specialty-glass-and-glass-ceramics/glass-ceramics/macor.html

[28] С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, А.С. Власов, В.П. Хвостиков. Письма в ЖТФ, **51** (14), 15 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.14.60763.20321

[29] Ю.А. Зингеренко. *Пассивные оптические сети XPON* (Ун-т ИТМО, СПб., 2020), с. 19, https://books.ifmo.ru/file/pdf/2672.pdf

[30] A. Carrasco-Casado, R. Vergaz, J.M. Sánchez Pena. *Proc. SPIE v. 8184, Unmanned/unattended sensors and sensor networks VIII* (Prague, Czech Republic, 20–21 September 2011), DOI: 10.1117/12.898216

[31] 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