

09.7

## Фотоприемное устройство для преобразования энергии и информации, передаваемых по атмосферному лазерному каналу

© С.О. Когновицкий, Д.А. Малевский, В.Р. Ларионов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kogno@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 11 июля 2022 г.

В окончательной редакции 11 июля 2022 г.

Принято к публикации 8 августа 2022 г.

Создано энергоинформационное фотоприемное устройство для автономного узла лазерной связи, предназначенное для приема энергии мощного лазерного излучения и преобразования ее в электроэнергию, а также для одновременной регистрации информационных высокочастотных оптических сигналов.

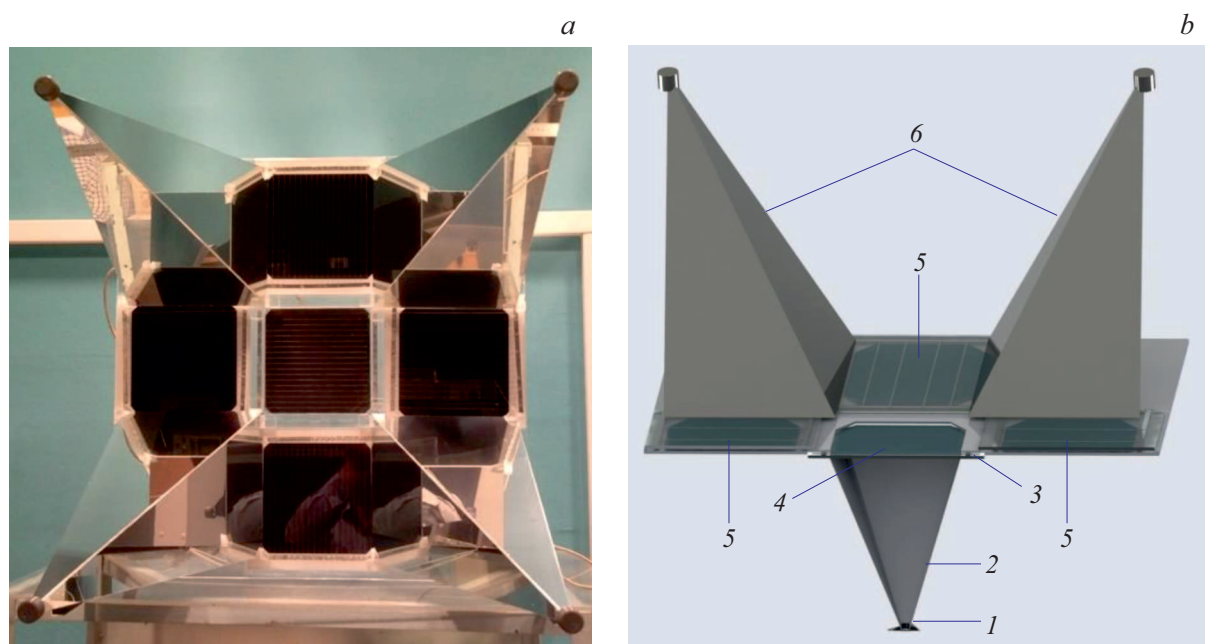
**Ключевые слова:** беспроводная передача энергии, лазерный луч, фотоприемное устройство, фотоэлектрический преобразователь, быстродействующий фотодиод.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.19.53586.19302

Беспроводная передача информации по атмосферным оптическим линиям связи давно реализована, например, компаниями ЗАО „Мостком“ (Рязань) и ООО НПК „Катарсис“ (Санкт-Петербург). Идея беспроводной передачи энергии лазерным излучением по открытому каналу с последующим ее фотоэлектрическим преобразованием на оконечном устройстве также воплощена (см. работы [1–4]). Например, разработанная компанией PowerLight лазерная система питала одну из базовых станций Ericsson сотовой связи 5G, которая не была подключена ни к какому другому источнику электропитания. Одновременная подача энергии и информации с помощью лазерного излучения по открытому каналу в космическом пространстве в пределах габаритов космического аппарата была применена для решения задачи трансформирования отражающей поверхности космической антенны [5].

В рамках настоящего исследования разработана концепция системы приема-передачи энергии и информации по одному атмосферному оптическому каналу на дальность до нескольких километров. Было проведено аналитическое исследование разнообразных вариантов компоновок такой системы, проанализирована возможность использования различных оптических спектральных диапазонов в видимой и инфракрасной областях с учетом окон прозрачности атмосферы, невидимости для человеческого глаза, наличия промышленно выпускаемых источников излучения достаточной мощности и фотоэлектрических преобразователей, их спектрально-пространственного сочетания и возможного влияния „энергетического“ излучения на приемник информационных сигналов. За основу был взят подход, при котором энергия и информация передаются излучениями с разными длинами волн, при этом в качестве мощного „энергетического“ излучения используется более коротковолновое излучение по сравнению с „информационным“ излучением. Выбор такого подхода предопределен,

в частности, фактором расходимости оптических лучей. При передаче мощного оптического излучения на большие расстояния, например лазерного излучения, его луч имеет особенность расходиться, образуя на приемной стороне в сечении круг значительного диаметра даже при использовании коллимирующей оптики. Поэтому для приема энергии необходимо использовать фотоприемную панель большой площади, плотно упакованную крупными фотоэлектрическими преобразователями, или использовать оптическую систему концентрирования излучения на фотопреобразователи относительно малой площади. Однако в последнем случае конструкция фотоприемной части должна быть усложнена для обеспечения принудительного теплоотвода от фотоприемника концентрированного излучения. В первом, более предпочтительном варианте крупные фотопреобразователи на фотоприемной панели нецелесообразно использовать в качестве приемников высокочастотно-модулированного „информационного“ излучения из-за их крайне низкого быстродействия по причине большой емкости. Поэтому для регистрации „информационного“ излучения должна быть организована независимая фотоприемная часть. По причине расходимости „информационного“ луча высокочастотно-модулированное излучение необходимо собирать с большой апертуры и концентрировать на быстродействующем фотодиоде с малой площадью фоточувствительной поверхности, характеризуемом малой электрической емкостью. Для того чтобы обеспечить компактность фотоприемного устройства, осуществляющего прием „энергетического“ и „информационного“ излучений, распространяющихся в общем пространственном атмосферном канале, подходящим конструктивным решением является размещение оптической системы концентрирования „информационного“ излучения позади (по ходу лучей) фотоприемной панели, преобразующей „энергетическое“ излучение, при этом фотоприемная панель должна обладать прозрачностью на длине



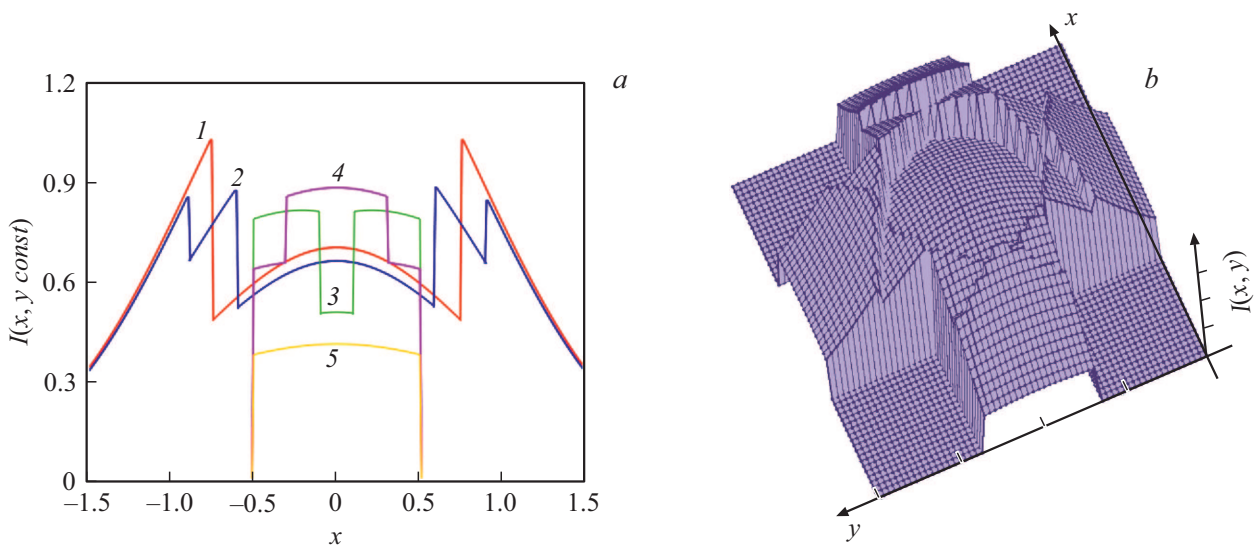
**Рис. 1.** *a* — фотография макета энергоинформационного фотоприемного устройства, вид с лицевой стороны. *b* — изображение поперечного сечения 3D-модели энергоинформационного фотоприемного устройства. 1 — InGaAs PIN фотодиод, 2 — полый фокус, 3 — линза Френеля, 4 — кремниевый фотоэлектрический преобразователь с двусторонней чувствительностью, прозрачный для информационного оптического излучения, 5 — кремниевые фотоэлектрические преобразователи (всего 4 шт.), 6 — зеркальные отражатели (всего 8 шт. отражающих граней).

волны „информационного“ излучения. Это условие может быть выполнено, если ширина запрещенной зоны основного полупроводникового материала фотопреобразователя „энергетического“ излучения будет больше, чем ширина запрещенной зоны полупроводникового материала высокочастотного фотодиода, при этом длина волны „энергетического“ излучения должна быть короче, чем у „информационного“.

На основе описанного подхода было создано компактное фотоприемное устройство для одновременного приема энергии и информации, передаваемых по открытому лазерному каналу в атмосфере. Основными критериями при конструировании устройства являлись простота конструкции, низкая себестоимость и наличие комплектующих на свободном рынке, что необходимо для гражданского применения. В результате были разработаны и изготовлены действующие полноразмерные макеты энергоинформационных фотоприемных устройств (рис. 1, *a*), экспериментально продемонстрирована их работоспособность и определены значения основных параметров, подтвердившие возможность их практического использования в системах лазерной связи, в том числе для электропитания активной аппаратуры удаленных узлов связи, лишенных сетевой электроэнергии, например размещенных на передвижных объектах.

Созданное фотоприемное устройство (рис. 1, *b*) включает пять фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе кремниевой НТ-структуры размером  $157 \times 157$  mm каждый, лежащих в одной плоскости и об-

разующих фотоприемную панель, предназначенную для фотоэлектрического преобразования „энергетического“ излучения, а также включает один быстродействующий фотодиод на основе решеточно-согласованной InGaAs PIN полупроводниковой структуры с длиной волны максимальной фоточувствительности  $1.55 \mu\text{m}$ , предназначенный для детектирования „информационного“ излучения и размещенный в фокусе концентратора, состоящего из конического полого фокуса с отражающей внутренней поверхностью и фокусирующей линзы Френеля, расположенной в плоскости широкого края фокуса. Четыре ФЭП размещены вокруг центрального ФЭП в форме креста. Особая сетчатая конструкция тыльного контакта центрального ФЭП, а также применение в его конструкции прозрачной ламинирующей пленки обеспечивают двустороннюю фоточувствительность такого ФЭП и его прозрачность для „информационного“ излучения с длиной волны около  $1.55 \mu\text{m}$ . Быстродействующий фотодиод с концентратором размещен позади центрального фотоэлектрического преобразователя соосно. На оптической оси между ФЭП и быстродействующим фотодиодом установлен светофильтр, предназначенный для повышения соотношения сигнал/шум информационного приема за счет подавления внешнего паразитного излучения, проходящего сквозь кремниевую структуру ФЭП в спектральной области ее прозрачности. В качестве такого светофильтра может быть использован однополосный интерференционный светофильтр NIR01-1550/3-25, характеризуемый пропусканием более



**Рис. 2.** *a* — модельное распределение интенсивности излучения на поверхности фотоприемной панели вдоль ее оси симметрии, проведенной через центры трех ФЭП (*I*), и вдоль линии, смещенной параллельно в плоскости панели от оси к краю панели на 0.3 (*2*), 0.7 (*3*), 0.9 (*4*), 1.4 единицы (*5*). *b* — 3D-изображение распределения интенсивности излучения вблизи поверхности фотоприемной панели с пятью ФЭП.

90% в спектральном диапазоне 1548.5–1551.5 nm. Края четырех периферийных ФЭП совмещены с соответствующими краями восьми зеркальных граней, отражающих „энергетическое“ лазерное излучение, приходящее во внешние области между периферийными ФЭП, на поверхность этих четырех ФЭП. При осесимметричном падении на фотоприемную панель луча „энергетического“ излучения в спектральной области поглощения кремния, имеющего centrosymmetric, например гауссово, распределение, суммарная мощность излучения, приходящего на каждый периферийный ФЭП, может приближаться к таковой для центрального ФЭП за счет отражения зеркальными гранями дополнительного излучения. Возможность этого подтверждена модельным расчетом распределения приходящей на поверхности ФЭП интенсивности излучения с учетом отражений (рис. 2). В модели падающее по нормали к поверхности фотоприемной панели излучение с плоским фронтом и гауссовым распределением интенсивности  $I(x, y)$  описано формулой

$$I(x, y) = k [\exp(-0.5(x^2/c_x^2 + y^2/c_y^2))] / (2\pi c_x c_y), \quad (1)$$

где  $k = 4.75$ ,  $c_x = 0.868$ ,  $c_y = c_x$ . При этом принято, что излучение в максимуме распределения имеет значение, равное единице.

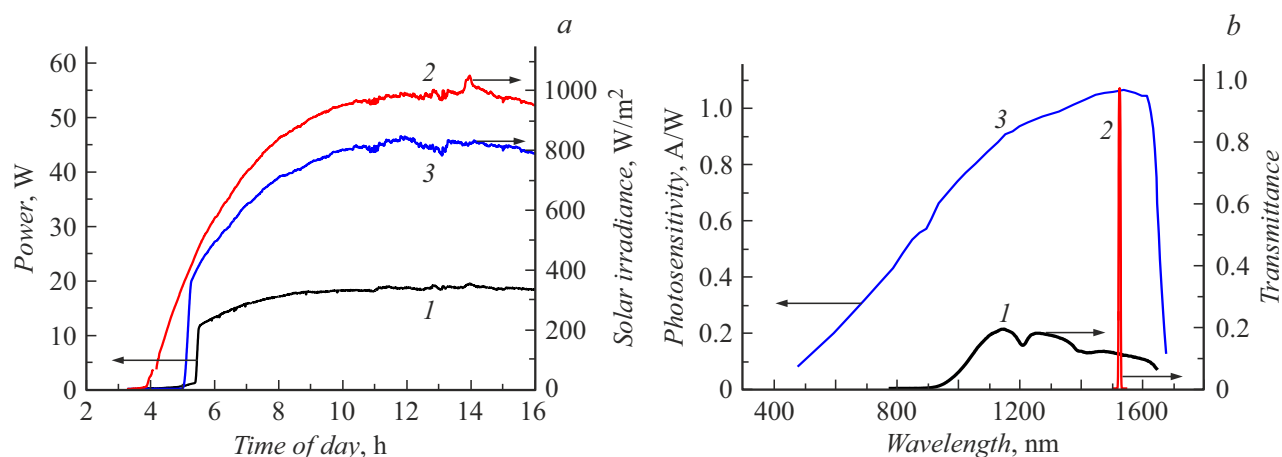
Также принято, что длина ребра ФЭП равна единице, угол между плоскостью фотоприемной панели и зеркальной алюминиевой гранью равен  $\pi/3$ , энергетический коэффициент отражения от зеркальной алюминиевой грани составляет 0.9, доля неотраженной интенсивности излучения от поверхности кремниевого ФЭП при нормальном падении принята равной 0.7, а при наклонном падении — 0.65. При указанных допущениях сум-

марные мощности излучения, которое может участвовать в фотоэлектрическом преобразовании в каждом из пяти ФЭП, совпадают с высокой точностью. Такое перераспределение падающего „энергетического“ излучения за счет отражения приводит к частичному выравниванию фототоков между всеми ФЭП, что делает возможным все ФЭП в устройстве электрически соединить последовательно практически без увеличения резистивных потерь и упрощает их коммутацию, а также увеличивает эффективность фотоприемной панели. Используемое для преобразования в фотоприемном устройстве „энергетическое“ лазерное излучение должно иметь длину волны из спектрального диапазона 0.6–1.06  $\mu\text{m}$ , а с учетом требования невидимости для человеческого глаза и наличия окон прозрачности атмосферы — лежать в диапазонах 0.85–0.9 или 0.95–1.06  $\mu\text{m}$ . Длина волны информационного высокочастотно-модулированного излучения должна находиться в диапазоне 1.3–1.6  $\mu\text{m}$ .

Основные технические характеристики созданного фотоприемного устройства следующие:

- генерируемая электрическая мощность до 80 W;
- граничная частота информационного приемника до 600 MHz;
- габариты (Д × Ш × В) 570 × 614 × 600 mm.

В дневное время фотоприемное устройство может вырабатывать дополнительную электроэнергию за счет преобразования солнечного излучения. Для экспериментального исследования данной возможности фотоприемное устройство было установлено на трекер системы слежения за Солнцем, и в течение солнечного дня проводились измерения вырабатываемой фотоприемным устройством мощности с помощью специализированной системы мониторинга солнечных батарей. Опре-



**Рис. 3.** *a* — выработка фотоприемным устройством в течение солнечного дня дополнительной электроэнергии за счет преобразования солнечного излучения (1), интенсивность полного солнечного излучения, падающего на следящую за Солнцем поверхность (2), интенсивность прямого солнечного излучения (3). *b* — совмещенные по единой спектральной шкале спектры пропускания кремниевого ФЭП (1), пропускания интерференционного светофильтра (2), а также фоточувствительности быстродействующего фотодиода (3).

делялось значение мощности в рабочей точке максимальной мощности. При этом синхронно записывались измеряемые системой мониторинга значения интенсивности полного солнечного излучения, падающего на следящую за Солнцем поверхность, а также прямого солнечного излучения, что важно для анализа энерговыработки фотоприемным устройством с учетом наличия в его конструкции отражающих граней, собирающих на ФЭП дополнительное прямое солнечное излучение. Результаты указанных измерений представлены на рис. 3, *a*. Мощность, вырабатываемая пятью ФЭП, в целом соответствует заявленной эффективности ФЭП, однако несколько меньше ожидаемой. Причинами этого являются, во-первых, отсутствие фасетированности фронтальной поверхности стекла ФЭП (использовалась гладкая поверхность), что снижает суммарную интенсивность излучения, достигающего поверхности кремниевой структуры, а во-вторых, неравномерное распределение суммарной интенсивности солнечного излучения вдоль поверхности фотоприемной панели, при котором на каждый из периферийных ФЭП за счет отражений от зеркальных граней приходится большая суммарная мощность, чем на центральный ФЭП, что отличается от квазиравномерного распределения, возникающего при падении гауссова пучка, для преобразования которого была оптимизирована конструкция фотоприемного устройства с отражателями. При меньшей по сравнению с мощностью периферийных ФЭП мощности излучения, падающего на центральный ФЭП, данный ФЭП будет генерировать меньший фототок, чем периферийные ФЭП, и ограничивать общий ток, так как ФЭП в фотоприемном устройстве соединены последовательно, что приводит к уменьшению эффективности при преобразовании излучения с исходным равномерным распределением, как у солнечного излучения. Необходимость

защиты информационного фотодиода от солнечного излучения, например, с помощью применения светофильтра подтверждается сравнительным анализом спектров пропускания кремниевого ФЭП и фоточувствительности быстродействующего фотодиода, демонстрирующих на рис. 3, *b* существенное перекрытие. Сложная форма спектра пропускания ФЭП, в котором наблюдаются два минимума, обусловлена многослойной конструкцией ФЭП, включающей кроме собственно многослойной кремниевой НЛТ-структуры несущее осветленное стекло с одной стороны от кремниевой структуры и прозрачную ламинирующую пленку с другой, которая и ответственна за образование минимумов пропускания в области 1212 и 1413 нм. Относительно малые величины пропускания ФЭП в области его спектральной прозрачности обусловлены отражениями проходящего излучения на многочисленных интерфейсах структуры и рассеянием на слегка рифленной внешней поверхности ламинирующей пленки.

Таким образом, при выполнении настоящей работы было создано энергоинформационное фотоприемное устройство, способное принимать энергию мощного лазерного излучения и преобразовывать ее в электроэнергию, а также одновременно детектировать информационные высокочастотные оптические сигналы. Такое устройство может найти применение, например, для дистанционного управления датчиками и аппаратурой на удаленных узлах запорной арматуры магистральных газопроводов, для построения в горной местности сети оптической связи, часть узлов которой лишена электроснабжения, а также для организации линий связи между энергооснащенным крупным космическим аппаратом и микроспутниками с малой бортовой энергетикой.

## Благодарности

Авторы благодарят Е.И. Терукова, М.З. Шварца и В.С. Калиновского за помощь в проведении исследований.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Е.С. Бойчук, Н.М. Киреева, А.А. Гаркушин, В.К. Струк, В.В. Криштоп, Ю.М. Карпец, А.И. Ливашвили, Бюллетень научных сообщений, **25**, 91 (2020).
- [2] Varanika, Akalya, Shanthi, Int. J. Eng. Res. Technol., **6** (14), 1 (2018).  
<https://www.ijert.org/research/wireless-laser-power-transmission-a-review-of-recent-progress-IJERTCONV6IS14093.pdf>
- [3] Р.А. Евдокимов, В.Ю. Тугаенко, Изв. РАН. Энергетика, № 5, 3 (2019). DOI: 10.1134/S0002331019050054
- [4] T. He, S.-H. Yang, H.-Y. Zhang, Ch.-M. Zhao, Y.-Ch. Zhang, P. Xu, M.Á. Muñoz, Chin. Phys. Lett., **31** (10), 104203 (2014). DOI: 10.1088/0256-307X/31/10/104203
- [5] Л.Б. Кочин, М.А. Крылова, Д.А. Хромихин, А.Д. Ширшов, В.Г. Порпылев, Решетневские чтения, **1**, 129 (2017).