

07

## Гибридные солнечные элементы с системой концентрации оптического излучения

© В.С. Калиновский<sup>1</sup>, Е.В. Контрош<sup>1,¶</sup>, А.В. Андреева<sup>1</sup>, В.М. Андреев<sup>1</sup>, В.В. Малютина-Бронская<sup>2</sup>, В.Б. Залесский<sup>2</sup>, А.М. Лемешевская<sup>3</sup>, В.И. Кузоро<sup>4</sup>, В.И. Халиманович<sup>4</sup>, М.К. Зайцева<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ГНПО „Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника“, Минск, Беларусь

<sup>3</sup> Филиал НТЦ „Белмикросистемы“ ОАО „Интеграл“ — управляющая компания холдинга „ИНТЕГРАЛ“, Минск, Беларусь

<sup>4</sup> АО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

<sup>5</sup> Научно-исследовательский институт космических систем им. А.А. Максимова — филиал ФГУП

„Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева“, Москва, Россия

¶ E-mail: kontrosh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 7 мая 2019 г.

В окончательной редакции 7 мая 2019 г.

Принято к публикации 13 мая 2019 г.

Разработаны и исследованы гибридные солнечные элементы (СЭ) на базе СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge и Si, интегрированных в кристаллическое кремниевое теплоотводящее основание, с системой концентрирования оптического излучения на основе линейных линз Френеля и углепластиковой несущей конструкции. Данные гибридные элементы с линейными концентраторами солнечного излучения в фотоэлектрическом модуле обеспечивают удельную электрическую мощность  $390 \text{ W/m}^2$  (AM0,  $1367 \text{ W/m}^2$ ) и снижение удельного веса фотогенерирующей части до  $1.0 \text{ kg/m}^2$ . Улучшенные фотоэлектрические характеристики и радиационная стойкость позволяют использовать созданные гибридные элементы с концентраторами излучения в космических солнечных батареях и автономных энергетических установках с концентрированием солнечного излучения.

**Ключевые слова:** многопереходный солнечный элемент, гибридный солнечный элемент, линейная линза Френеля, концентраторный фотоэлектрический модуль, солнечная батарея.

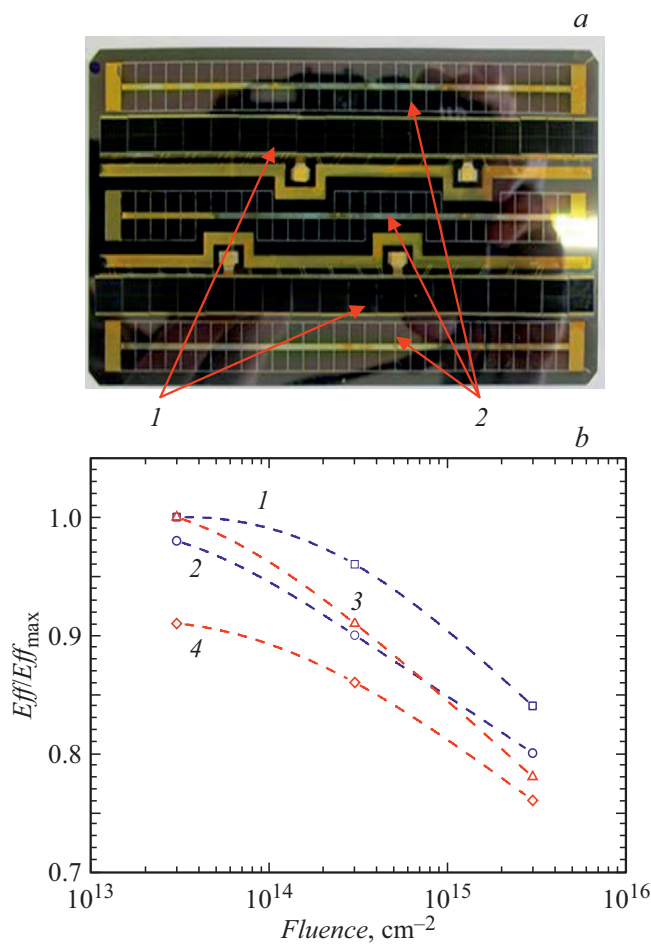
DOI: 10.21883/PJTF.2019.16.48159.17868

Актуальной задачей космической солнечной энергетики является создание солнечных батарей с высокими энергетическими и эксплуатационными характеристиками. Повышение эффективности многопереходных солнечных элементов на основе соединений A3B5 может быть достигнуто при использовании систем концентрирования солнечного излучения с обеспечением эффективных условий отвода тепла в окружающую среду, например в составе концентраторного фотоэлектрического модуля (КФЭМ).

Многопереходные солнечные элементы достигают максимального КПД при преобразовании концентрированного солнечного излучения в широком температурном диапазоне и обеспечивают хорошую радиационную стойкость [1–4]. При создании элементарного КФЭМ требуется обеспечить высокую эффективность как линейных линзовых концентраторов оптического излучения в требуемом спектральном диапазоне, так и солнечных элементов (СЭ) при эффективном рассеивании в пространство остаточного тепла [5–7]. Исходя из этих требований был разработан и изготовлен гибридный солнечный элемент (ГСЭ) для КФЭМ. ГСЭ включает в себя фотоактивное кристаллическое кремниевое теплоотводящее основание (ТО) и смонтированные на нем электрогенерирующие линейки из СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge (рис. 1).

Для предотвращения инверсии проводимости под слоем окисла по поверхности интегрированных в ТО кремниевых солнечных элементов (рис. 1) было осуществлено ионное легирование бором с флюенсом  $F_i = (5.0–20) \cdot 10^{13} \text{ ion/cm}^2$ . Для предотвращения утечек между кремниевыми  $n^+/p$ -диодами каждый интегрированный кремниевый солнечный элемент окружен сильнолегированными охранными кольцами  $p^+$ -типа ( $F_i = 1.9 \cdot 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ ). Для повышения величины пробивного напряжения изоляции при  $T = 1000^\circ\text{C}$  был выполнен отжиг с разгонкой областей  $n^+/p$ -диодов и  $p^+$ -охранных колец.

В конструкции кремниевое СЭ заложены два уровня металлизации. Путем напыления AlSi толщиной  $0.45 \mu\text{m}$  формируется первый уровень металлизированной разводки, обеспечивающий низкоомный контакт к  $n^+$ -областям интегрированных в ТО кремниевых СЭ. В качестве межуровневого диэлектрика использован двухслойный материал из плазмохимических (ПХ) окислов + ПХ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с суммарной толщиной  $1.0 \mu\text{m}$ , обеспечивающий изоляцию между металлизированными уровнями и СЭ. Второй уровень металлизированной разводки формировался осаждением металлов Ti–Ni толщиной  $1.2 \mu\text{m}$  с последующим электрохимическим усилением золотом. Результаты измерений на ГСЭ удельного сопротивления ( $R_s$ ) между контактными пло-



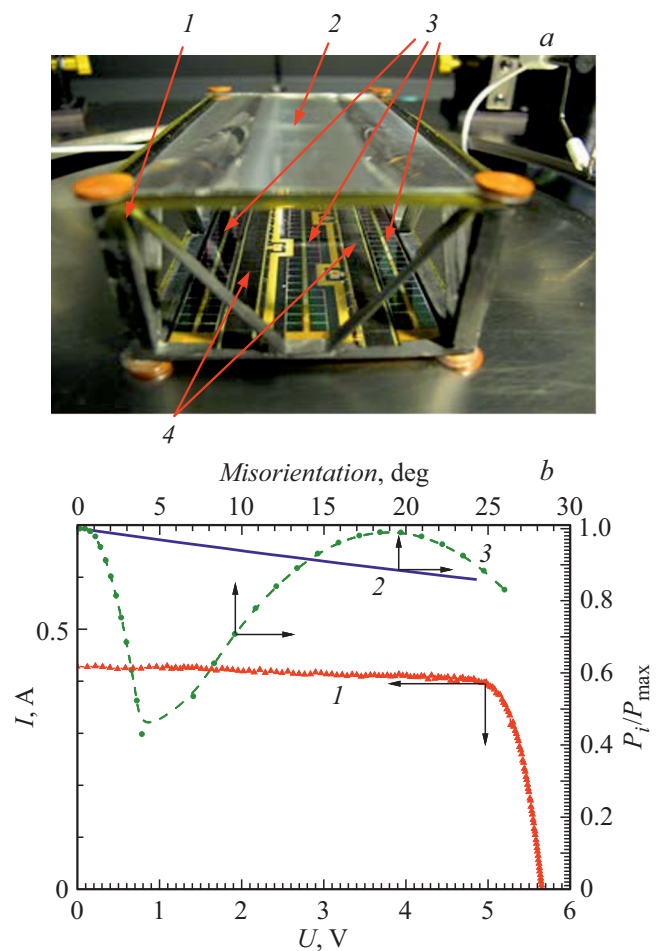
**Рис. 1.** *a* — образец гибридного солнечного элемента с габаритным размером кремниевого теплообрасывающего основания  $0.25 \times 54 \times 104$  mm: 1 — электрогенерирующие линейки из СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge, 2 — интегрированные в теплообрасывающее Si-основание кремниевые СЭ. *b* — зависимости КПД гибридного солнечного элемента от флюенса электронов с энергией 1 MeV: 1, 2 — для электрогенерирующих линеек из СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge, 3, 4 — для кремниевых СЭ, 1, 3 — в составе модуля, 2, 4 — вне его.

щадками и кремниевыми солнечными элементами показали, что  $R_s > 10^{10} \Omega$  при приложении напряжения смещения величиной 10 V и более.

На токоведущие контактные шины *p*-кремниевого ТО вакуумной пайкой монтировались утоненные до 50 μm СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge. Трехпереходные СЭ были изготовлены по технологии, изложенной в работах [3,4], позволившей повысить КПД многопереходных СЭ до 35% при кратности концентрирования солнечного излучения порядка 10 солнц ( $AM0, 1367 \text{ W/m}^2$ ).

В качестве концентратора солнечного излучения в КФЭМ использовалась сдвоенная линейная линза Френеля с фокусом 32 mm и оптической площадью каждой линзы  $5 \times 10 \text{ cm}$  (рис. 2, *a*). Эффективность разработанных линейных линзовых концентраторов типа линз Френеля составила 90% при измерениях на импульсном

имитаторе солнечного излучения ( $AM0, 1367 \text{ W/m}^2$ ). Несущая углепластиковая конструкция модуля (рис. 2, *a*) разработана таким образом, чтобы при минимальных весовых характеристиках обеспечить оптимальное плоскопараллельное размещение линейных линзовых концентраторов и гибридных солнечных элементов, ослабив влияние механических воздействий от несущего корпуса к линзовому блоку при термоциклировании и вибрационных нагрузках. Особенность разработанной конструкции заключается в использовании полноразмерного сдвоенного линзового блока и ГСЭ, равных между собой по размерам, и в то же время независимых элементов всей конструкции с передачей им части механических функций [8]. Это обеспечивает хорошую технологичность при изготовлении и сборке с возможностью



**Рис. 2.** *a* — фотография концентраторного фотоэлектрического модуля: несущая углепластиковая рама (1), сдвоенный линейный линзовый концентратор (2), ГСЭ на основе кремниевого ТО с тремя интегрированными кремниевыми СЭ (3) и электрогенерирующих линеек из СЭ InGaP/GaAs/Ge (4). *b* — световая характеристика модуля для последовательно включенных электрогенерирующих линеек при засветке на импульсном имитаторе коллимированного солнечного излучения ( $AM0, 1367 \text{ W/m}^2$ ) (кривая 1) и разориентационные характеристики модуля вдоль линии фокуса (кривая 2) и перпендикулярно линии фокуса (кривая 3).

последующего мультиплицирования в полномасштабные панели солнечных батарей с концентраторами.

Измерения световых (нагрузочных) вольт-амперных характеристик ГСЭ и КФЭМ выполнены на импульсном имитаторе коллимированного солнечного излучения АМ0 ( $1367 \text{ W/m}^2$ ). Световая вольт-амперная характеристика КФЭМ для двух последовательно включенных электрогенерирующих линеек из СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge гибридного солнечного элемента представлена на рис. 2, *b* (кривая 1). Коэффициент полезного действия КФЭМ с ГСЭ составил 28.7%, а выходная удельная электрическая мощность модуля более  $390 \text{ W/m}^2$ . Теплоотводящее основание на базе кристаллического кремния размером  $54 \times 104 \text{ mm}$  и толщиной  $0.25 \text{ mm}$  позволяет при средней кратности концентрирования 10 солнц и более (АМ0,  $1367 \text{ W/m}^2$ ) осуществить эффективный отвод остаточного тепла от утоненных многопереходных СЭ и увеличить благодаря интегрированным в них кремниевым СЭ допустимый угол разориентации КФЭМ в направлении, перпендикулярном оси линии фокуса.

Разориентационные характеристики КФЭМ представлены на рис. 2, *b*. Кривые 2 и 3 на этом рисунке показывают изменения мощности вдоль линейного фокуса и перпендикулярно фокусу соответственно. Допустимая разориентация КФЭМ составляет в двух ортогональных направлениях более  $\pm 23^\circ$ .

Образцы ГСЭ были подвергнуты при комнатной температуре облучению электронами с энергией  $1 \text{ MeV}$  в диапазоне флюенсов  $3 \cdot 10^{13} - 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  как в составе КФЭМ, так и вне его. На рис. 1, *b* показано изменение КПД электрогенерирующей линейки из СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge (кривые 1, 2) и интегрированного в ТО кремниевого СЭ (кривые 3, 4). Видно, что в составе КФЭМ снижение КПД электрогенерирующих линеек и интегрированных кремниевых СЭ при достижении флюенса  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  составило 10 и 15% соответственно. В то же время при этом же значении флюенса облучения, но вне КФЭМ величина деградации КПД элементов гибридного СЭ примерно в 1.5 раза больше. Удельный вес фотогенерирующей части КФЭМ — гибридный солнечный элемент и линейный линзовый концентратор составил  $\sim 1.0 \text{ kg/m}^2$ .

Исходя из полученных результатов можно полагать, что снижение выходной электрической мощности разработанных ГСЭ в составе КФЭМ при эксплуатации, например, на геостационарной орбите в течение 20 лет составит не более 20%.

Разработаны гибридные солнечные элементы, состоящие из утоненных до  $50 \mu\text{m}$  СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge и фотоактивных теплоотводящих оснований из кристаллического кремния размером  $54 \times 104 \text{ mm}$  и толщиной  $0.25 \text{ mm}$  с тремя интегрированными кремниевыми солнечными элементами. КФЭМ на основе разработанного гибридного солнечного элемента с линейными линзовыми концентраторами на импульсном имитаторе солнечного излучения (АМ0,  $1367 \text{ W/m}^2$ ) обеспечил

КПД, равный 28.7%, и удельную выходную электрическую мощность более  $390 \text{ W/m}^2$ . Использование разработанных гибридных солнечных элементов и линзовых концентраторов позволяет снизить удельную массу фотогенерирующей части до  $1.0 \text{ kg/m}^2$  с возможностью мультиплицирования в полномасштабные панели солнечных батарей. Солнечные батареи, созданные на основе разработанных КФЭМ, будут иметь сниженную пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения стоимость и при этом обладать радиационной стойкостью со сроком эксплуатации на геостационарных орбитах до 20 лет.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D.* III-V solar cells and concentrator arrays // High-efficient low-cost photovoltaics. Springer Ser. in Optics Sciences. V. 140 / Ed. V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberg. Springer, 2009. P. 101–141.
- [2] *Strobl G., LaRoche G., Rash K.D., Hey G.* From extraterrestrial to terrestrial applications // High-efficient low-cost photovoltaics. Springer Ser. in Optics Sciences. V. 140 / Ed. V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberg. Springer, 2009. P. 7–27.
- [3] *Kalinovsky V.S., Grebenshchikova E.A., Dmitriev P.A., Pinskaya N.D., Kontrosh E.V., Malevskaya A.V., Usikova A.A., Andreev V.M.* // AIP Conf. Proc. 2014. V. 1616. P. 326–330.
- [4] *Kontrosh E.V., Malevskaya A.V., Lebedeva N.M., Kalinovskiy V.S., Andreev V.M.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 690. P. 012036.
- [5] *O'Neill M., McDanal A.J., Brandhorst H., Spence B., Iqbal S., Sharps P., McPheeters C., Steinfeldt J., Piszczor M., Myers M.* Space photovoltaic concentrator using robust fresnel lenses, 4-junction cells, graphene radiators, and articulating receivers // Proc. of IEEE 43th Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC). Portland, Oregon, 2016. P. 1337–1342.
- [6] *Michel C., Loicq J., Languy F., Habraken S.* // Solar Energy Mater. Solar Cells. 2014. V. 120. Pt A. P. 183–190.
- [7] *O'Neill M., McDanal A.J., Piszczor M., Myers M., Sharps P., McPheeters C., Steinfeldt J.* Line-focus and point-focus space photovoltaic concentrators using robust fresnel lenses, 4-junction cells, & graphene radiators // Proc. of IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC). Washington, DC, 2017. P. 525–530.
- [8] *Kuzoro V., Khalimanovich V., Kalinovskiy V., Vasileva T.* Patent RU N 2014127672. Publ. 07.07.2014.