

09.7;07.2

## Разработка и исследование макета автономной энергоинформационной станции атмосферной оптической линии связи

© В.С. Калиновский, Е.И. Теруков, Ю.В. Ащеулов, Е.В. Контрош, В.С. Юферев, К.К. Прудченко, А.В. Чекалин, Е.Е. Терукова, И.А. Толкачев, С.Е. Гончаров, В.М. Устинов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vitak.sopt@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 июля 2022 г.

В окончательной редакции 10 ноября 2022 г.

Принято к публикации 14 ноября 2022 г.

Разработан и исследован макет автономной энергоинформационной приемной станции для атмосферных оптических линий связи на основе многосекционного энергетического гетероструктурного (НТ) Si-фотопреобразователя и информационного фотоприемного устройства на основе AlGaAs/GaAs  $p-i-n$ -фотодиодов. Энергетическая часть при возбуждении лазерным излучением мощностью  $\sim 264$  W на длине волны  $0.974 \mu\text{m}$  в фотовольтаическом режиме обеспечивала электрическую мощность  $\geq 60$  W. Фотоприемное устройство информационного канала при возбуждении импульсным излучением на длине волны  $0.78 \mu\text{m}$  обеспечивало в фотовольтаическом режиме быстродействие в субнаносекундном диапазоне.

**Ключевые слова:** атмосферные оптические линии связи, приемная станция, НТ Si-фотопреобразователь, AlGaAs/GaAs  $p-i-n$ -фотоприемное устройство, лазерное излучение, импульсное излучение.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.02.54281.19306

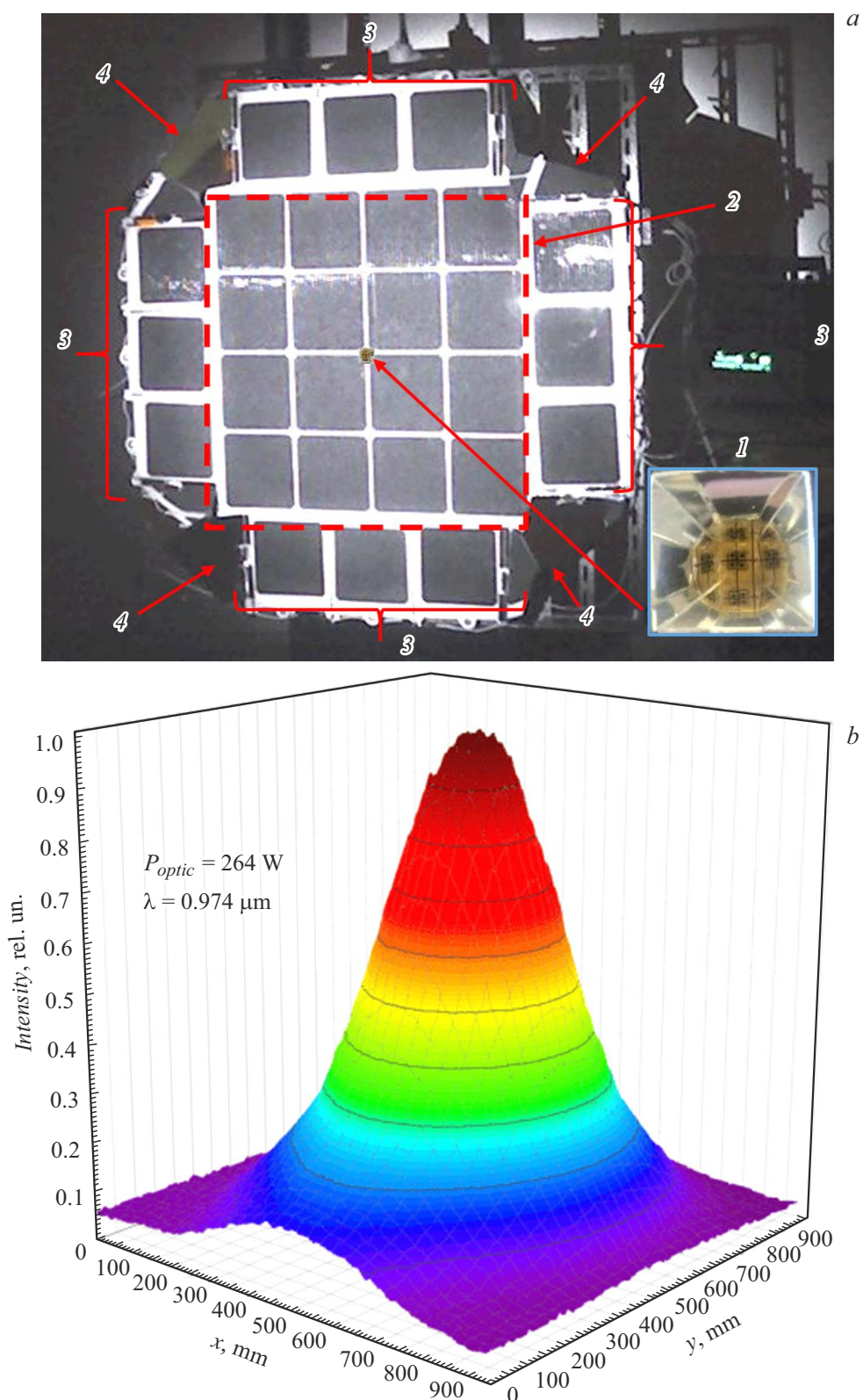
Атмосферные оптические линии связи (АОЛС) [1] необходимы для создания беспроводных высокоскоростных информационных каналов как в мегаполисах, так и в отдаленных регионах для обеспечения оперативной связи [2–5]. Основное применение АОЛС — для случаев „удлинения“ стационарных линий связи в пределах „последней мили“, когда требуется обеспечить хорошо защищенный дуплексный канал. В таком сценарии, когда одна приемопередающая станция АОЛС обеспечена стационарным электропитанием, а вторая расположена на удаленном конце линии связи и не имеет стационарного энергообеспечения, возникает проблема ее надежного и долговременного функционирования. Зарубежные [1–5] и отечественные [6,7] приемопередающие станции АОЛС, как правило, включают в себя источник модулированного излучения для передачи информации по лазерному лучу и быстродействующий фотоприемник лазерного излучения для приема ответного сигнала от другой станции дуплексного канала. Данные системы не имеют встроенных дополнительных фотопреобразователей, принимающих лазерное излучение через открытое пространство для энергообеспечения приемопередающей станции. В настоящей работе впервые предложено создание подобных автономных станций АОЛС на основе гибридных фотопреобразователей из  $\alpha$ -Si:H/Si-фотопреобразователей (ФЭП), преобразующих мощное лазерное излучение на длине волны  $\lambda_1$  в окне прозрачности атмосферы, и наногетероструктурных ФЭП на основе соединений  $A_3B_5$  для информационного канала, работающего на длине волны  $\lambda_2$ , где  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ . Гибридные

ФЭП обеспечивают электропитанием приемопередающие каналы станций АОЛС.

В работе приведены результаты исследования характеристик макета автономной многосекционной приемной станции АОЛС, созданной на основе энергетического канала из гетероструктурных (НТ) ФЭП и информационного из AlGaAs/GaAs  $p-i-n$ -фотодиодов, работающих в фотовольтаическом режиме соответственно на длинах волн  $0.974$  и  $0.78 \mu\text{m}$ .

Исследованы характеристики макета автономной энергоинформационной приемной станции АОЛС (рис. 1, а), состоящего из многосекционного энергетического фотопреобразующего устройства (МЭФУ) и информационного AlGaAs/GaAs  $p-i-n$ -фотоприемника (ФП), работающих одновременно в фотовольтаическом режиме.

МЭФУ было собрано из НТ-элементов размером  $15.6 \times 15.6$  см (рис. 1, а). НТ ФЭП были изготовлены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) на текстурированную  $c$ -Si подложку  $n$ -типа [8]. Далее методом магнетронного распыления (PVD) осадились слои оксида индия-олова (ITO). На поверхности слоев ITO методом трафаретной печати формировались контактные Ag-шины. Макет МЭФУ состоит из двух модулей: центрального, включающего 16 последовательно соединенных элементов, и периферийного, включающего 12 последовательно соединенных НТ-элементов. Байпасные диоды в количестве 28 штук включены во встречном направлении параллельно к каждому из элементов.



**Рис. 1.** *a* — фотография макета автономной энергоинформационной приемной станции для атмосферных оптических линий связи: информационный AlGaAs/GaAs *p-i-n*-ФП (1), центральный (2) и периферийный (3) модули МЭФУ, состоящие из НКТ ФЭП, угловые отражатели из Al (4); *b* — распределение интенсивности лазерного излучения мощностью 264 W ( $\lambda = 0.974 \mu\text{m}$ ) на поверхности МЭФУ; *c* — распределение температуры на лицевой стороне макета МЭФУ в режиме постоянного лазерного излучения мощностью 264 W ( $\lambda = 0.974 \mu\text{m}$ ).

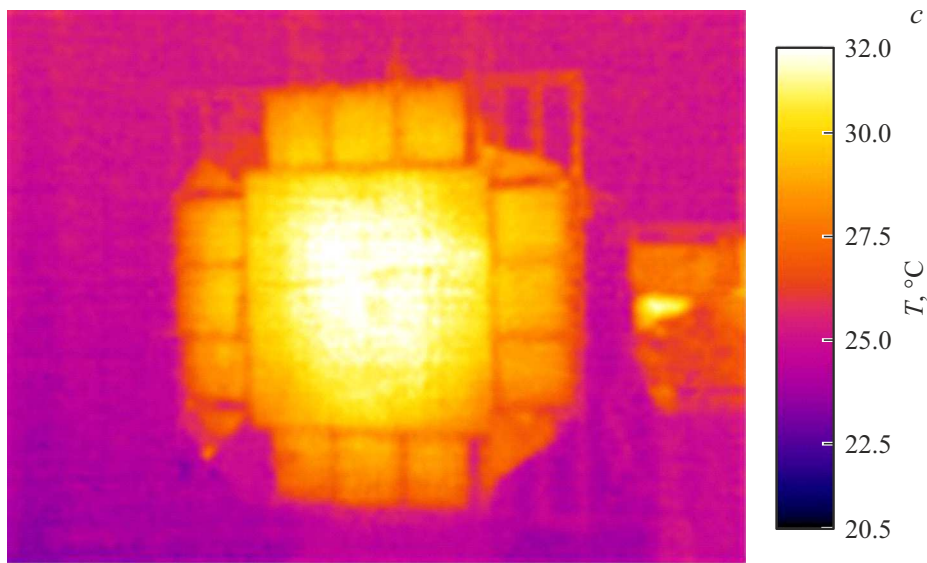


Рис. 1 (продолжение).

Информационный ФП был изготовлен из четырех последовательно включенных AlGaAs/GaAs  $p-i-n$ -фотодиодов (ФД) с диаметром фотоактивной поверхности  $500 \mu\text{m}$ . Эпитаксиальная гетероструктура ФД, выращенная методом молекулярно-пучковой эпитаксии [9], содержала в себе GaAs  $p-i-n$ -переход, а также широкозонное окно и тыльный потенциальный барьеры на основе твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Электрическая коммутация и монтаж  $p-i-n$ -ФД выполнены на теплоотводящем основании AlN. На фотоактивной поверхности ФД были сформированы силиконовые линзы. Информационный ФП с оптическим концентратором (фоконом) из алюминия был смонтирован непосредственно в центре фотоактивной поверхности энергетического МЭФУ (рис. 1, а).

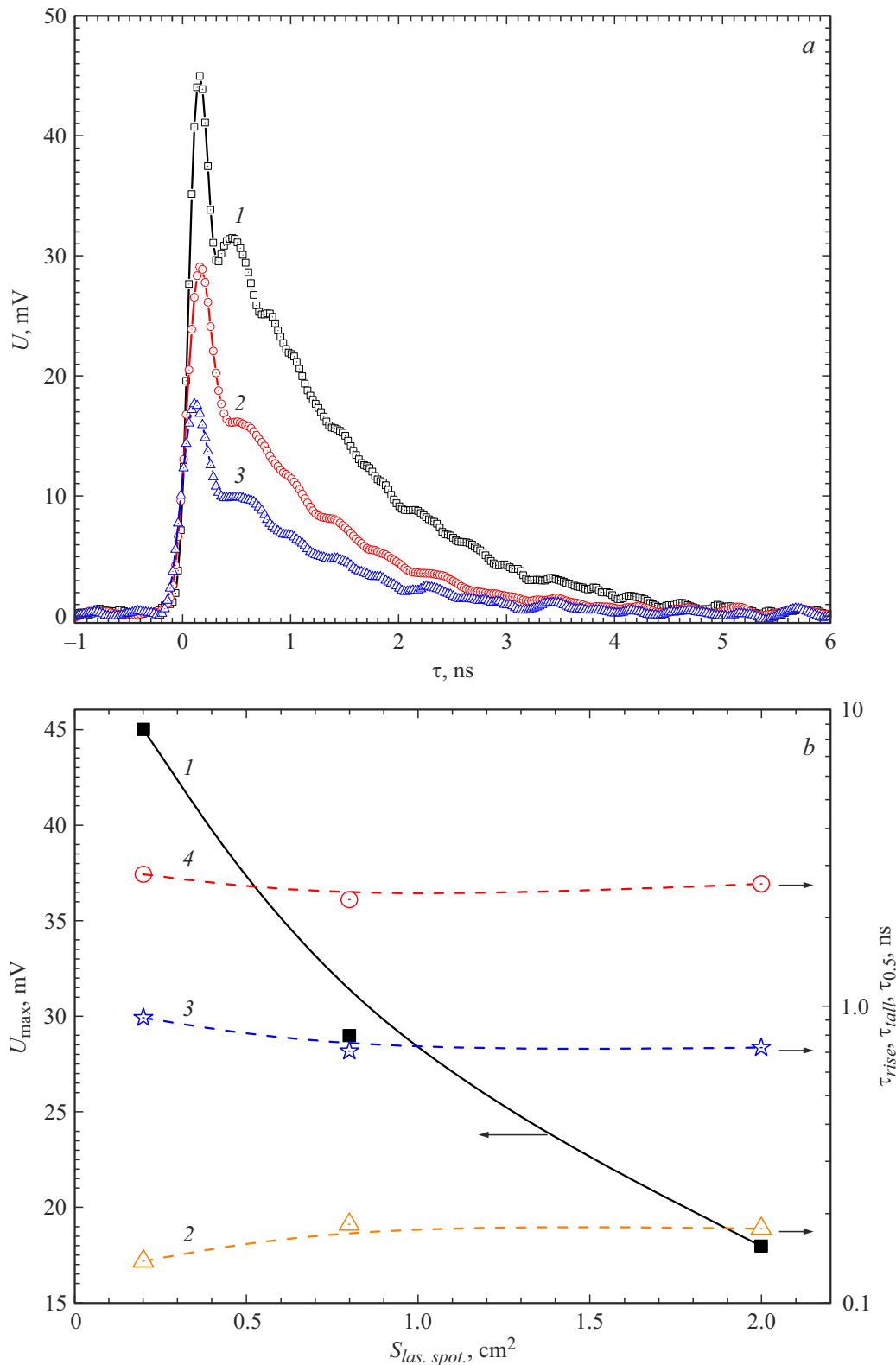
Измерения фотоэлектрических характеристик макета АОЛС осуществлялись при одновременном освещении непрерывным лазерным излучением мощностью до  $264 \text{ W}$  на длине волны  $0.974 \mu\text{m}$  и импульсным лазерным излучением на длине волны  $0.78 \mu\text{m}$  со средней мощностью до  $120 \text{ mW}$  и длительностью на полувывоте  $\leq 10 \text{ ps}$  с частотой следования  $71 \text{ MHz}$ . Для имитации расходимости лазерного излучения в атмосфере измерения фотоэлектрических характеристик макетов АОЛС проводились при воздействии лазерным излучением с использованием оптоволокон. Диаметр сердцевины оптоволокон информационного канала ( $0.78 \mu\text{m}$ ) составлял  $200 \mu\text{m}$ , а энергетического ( $0.974 \mu\text{m}$ ) —  $135 \mu\text{m}$ . Угол расходимости лазерного излучения на выходе из оптоволокон составлял  $\geq 10^\circ$ . На рис. 1, б представлено распределение интенсивности лазерного излучения энергетического канала на поверхности МЭФУ. Распределение теплового поля по поверхности МЭФУ при воздействии непрерывного лазерного излучения приведено на рис. 1, с. Согласно распределению температуры

при возбуждении излучением ( $0.974 \mu\text{m}$ ) мощностью  $264 \text{ W}$ , пиковое значение температуры ФЭП составляло  $\sim 32^\circ\text{C}$ .

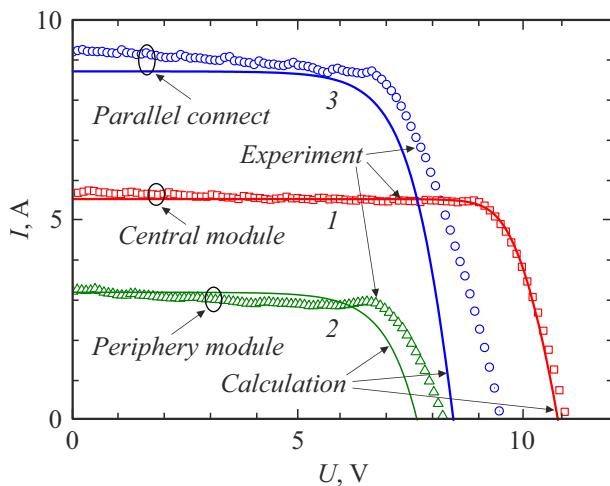
Спектральная чувствительность AlGaAs/GaAs  $p-i-n$ -ФД находится в диапазоне от  $0.7$  до  $0.9 \mu\text{m}$ , в то время как для НТТ-элементов — в пределах от  $0.4$  до  $1.1 \mu\text{m}$ . Значение внешней квантовой эффективности ФД на длине волны информационного сигнала  $0.78 \mu\text{m}$  и НТТ-элементов на длине волны энергетического сигнала  $0.974 \mu\text{m}$  составляло  $\sim 90\%$ .

Измерения параметров импульса фотоотклика информационного ФП выполнены в фотовольтаическом режиме. Полученные формы импульса фотоотклика и временные параметры приведены на рис. 2, а, б. Согласно полученным результатам, с увеличением площади пятна лазерного излучения от  $0.2$  до  $2 \text{ cm}^2$  амплитуда импульса сигнала на нагрузке  $50 \Omega$  спадает на  $60\%$ , а временные параметры существенно не изменяются. При площади пятна лазерного излучения  $2 \text{ cm}^2$  получены следующие результаты: амплитуда напряжения импульса сигнала на нагрузке  $50 \Omega$  составила  $18 \text{ mV}$ , время нарастания амплитуды импульса  $\tau_{rise} = 0.18 \text{ ns}$ , время спада  $\tau_{fall} = 2.6 \text{ ns}$ , длительность импульса на полувывоте амплитуды  $\tau_{0.5} = 730 \text{ ps}$  (рис. 2).

На рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные нагрузочные вольт-амперные характеристики (ВАХ) МЭФУ при возбуждении лазерным излучением на длине волны  $0.974 \mu\text{m}$ . В основу моделирования нагрузочных характеристик были положены экспериментальные темновые характеристики отдельного НТТ-элемента. При этом оказалось, что хорошее совпадение расчетных и экспериментальных световых ВАХ для НТТ-элемента получается только в том случае, если уменьшить контактное сопротивление, определенное из фиттинга темновой ВАХ, до величины  $1.2 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Распределение



**Рис. 2.** *a* — импульсы фотоотклика AlGaAs/GaAs *p-i-n*-ФП с фооном при площади пятна лазерного излучения 0.2 (1), 0.8 (2), 2 см<sup>2</sup> (3); *b* — зависимости максимального значения амплитуды  $U_{max}$  импульса (1), времени нарастания  $\tau_{rise}$  (2), длительности импульса на уровне полувисоты амплитуды  $\tau_{0.5}$  (3) и времени спада  $\tau_{fall}$  (4) от размера пятна лазерного излучения ( $\lambda = 0.78 \mu\text{m}$ ) на входе информационного ФП.



**Рис. 3.** Экспериментальные и расчетные световые ВАХ макета МЭФУ при возбуждении лазерным излучением на длине волны  $\lambda = 0.974 \mu\text{m}$  мощностью 264 W. 1 — для центрального модуля, 2 — для периферийного модуля, 3 — для их параллельного включения.

интенсивности лазерного излучения по поверхности МЭФУ имело форму, близкую к распределению Гаусса (рис. 1, б). При расчете световых ВАХ принималось, что плотность тока в каждой точке НТ-элемента определяется локальной интенсивностью излучения в этой точке и приложенным напряжением, т. е. не зависит от тока в соседних точках. Из рис. 3 видно, что для центрального блока МЭФУ совпадение нагрузочных кривых оказалось довольно хорошим, в то время как для периферийных блоков различия в напряжении холостого хода  $U_{oc}$  и максимальной мощности весьма значительны. Последнее объясняется тем, что интенсивность лазерного излучения в окрестности периферийных блоков заметно отклоняется от „традиционного“ распределения Гаусса (причем в большую сторону), которое использовалось в расчетах. В результате рассчитанное значение максимальной электрической мощности оказывается равным 54 W, что на 10% меньше экспериментального. Необходимо отметить также, что из-за более слабой освещенности периферийных блоков ток МЭФУ с ростом напряжения уменьшается гораздо быстрее, чем ток центрального блока, что приводит к уменьшению  $U_{oc}$  и снижению эффективности преобразования. Заметим, что, например, при параллельном соединении центрального и периферийных модулей и неравномерном освещении токи внутри МЭФУ в указанных модулях оказываются отличными от нуля даже в режиме холостого хода, замыкаясь друг на друга.

Согласно измеренным световым ВАХ, при параллельном подключении центрального и периферийного модулей достигнутое максимальное экспериментальное значение вырабатываемой постоянной электрической мощности составило  $\geq 60 \text{ W}$  при мощности лазерного излучения 264 W ( $\lambda = 0.974 \mu\text{m}$ ). В этом случае КПД

без учета оптических потерь на межэлементных, не фотоактивных участках периферийного модуля макета составляет  $\sim 22.7\%$ , а с учетом оптических потерь  $\geq 25\%$ .

Впервые разработан и изготовлен макет энергетически автономной станции АОЛС на основе многосекционного энергоинформационного фотопреобразующего устройства из  $\alpha\text{-Si:H/c-Si-ФЭП}$  и  $\text{AlGaAs/GaAs } p\text{-i-n-ФП}$ . Созданный макет АОЛС обеспечивает в фотовольтаическом режиме работы одновременное преобразование непрерывного лазерного излучения на длине волны  $0.974 \mu\text{m}$  мощностью  $\sim 264 \text{ W}$  с эффективностью  $\sim 25.0\%$  и прием импульсного монохроматического излучения на длине волны  $0.78 \mu\text{m}$  с фотооткликом длительностью на полувысоте амплитуды  $\leq 900 \text{ ps}$ .

### Финансирование работы

Представленные результаты получены при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки РФ.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] M. Garlińska, A. Pręgoska, K. Masztalerz, M. Osial, Future Internet, **12**, 179 (2020). DOI: 10.3390/fi12110179
- [2] A.J. Aljohani, J. Mirza, S. Ghafoor, IEEE Commun. Lett., **25**, 196 (2021). DOI: 10.1109/LCOMM.2020.3029591
- [3] R. Miglani, J.S. Malhotra, A.R. Majumdar, F. Tubbal, R. Raad, IEEE Photon. J., **12**, 7904621 (2020). DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3013525
- [4] M.S. Khan, S. Ghafoor, J. Mirza, S.M. Hassan Zaidi, in *2019 IEEE 16th Int. Conf. on smart cities: improving quality of life using ICT & IoT and AI (HONET-ICT)* (IEEE, 2019), p. 074–079. DOI: 10.1109/HONET.2019.8908077
- [5] S. Liverman, H. Bialek, A.S. Natarajan, A.X. Wang, J. Lightwave Technol., **38**, 1659 (2020). DOI: 10.1109/JLT.2019.2958733
- [6] А.А. Боев, М.Ю. Керносов, С.Н. Кузнецов, Б.И. Огнев, А.А. Паршин, Вестн. Рязан. гос. радиотехн. ун-та, **62** (4), 44 (2017). DOI: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-44-48
- [7] S. Kuznetsov, B.I. Ogniev, S. Polyakov, S. Yurko, SPIE Newsroom (2014). DOI: 10.1117/2.1201405.005486
- [8] A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov, in *High-efficient low-cost photovoltaics*, ed. by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger, Springer Ser. in Optical Sciences (Springer, Cham, 2020), vol. 140, p. 113–132. DOI: 10.1007/978-3-030-22864-4\_7
- [9] В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, Г.В. Климов, Т.С. Табаров, С.В. Иванов, В.М. Андреев, Письма в ЖТФ, **44** (22), 33 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2023.02.54281.19306 [V.S. Kalinovskii, E.V. Kontrosh, G.V. Klimko, T.S. Tabarov, S.V. Ivanov, V.M. Andreev, Tech. Phys. Lett., **44**, 1013 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018110214].