

07

Модули фотоэлектрических преобразователей лазерного ($\lambda = 809–850 \text{ nm}$) излучения

© В.П. Хвостиков, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.С. Потапович, О.А. Хвостикова, С.В. Сорокина, М.З. Шварц

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

Поступило в Редакцию 4 февраля 2020 г.
В окончательной редакции 17 марта 2020 г.
Принято к публикации 18 апреля 2020 г.

Представлен высокоэффективный фотоэлектрический модуль, оптимизированный для преобразования монохроматического излучения с длиной волны 809–850 nm. Модуль включает четыре фотопреобразователя общей площадью 16 см², которые при работе с лазерным излучением мощностью более 1 W обеспечивают рабочее напряжение более 4 V. При разработке и создании AlGaAs/GaAs-структур для приемников-преобразователей излучения использовались метод эпитаксии из жидкой фазы и метод газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений. При работе фотоэлектрического модуля в режиме равномерной облученности светопринимающей поверхности эффективность преобразования мощного (6.2 W) лазерного излучения превысила 60%.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, лазерное излучение, AlGaAs/GaAs, модуль, эпитаксия.

DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49811.43-20

Введение

В литературе достаточно много работ посвящено вопросам создания фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) лазерного излучения (ЛИ), в том числе для длины волны $\lambda = 800–850 \text{ nm}$ [1–6] и преобразователей, состоящих из нескольких последовательно соединенных сегментов [7–9], что позволяет увеличивать рабочее напряжение. Значительно меньше доступной информации о модулях, объединяющих несколько отдельных ФЭП ЛИ, особенностях их конструирования и тестирования [4,10,11].

Лазерное излучение в отличие от солнечного монохроматично, что позволяет значительно снизить или исключить оптические и термализационные потери энергии и, следовательно, повысить КПД фотоэлектрического преобразования. При разработке ФЭП под заданную длину волны излучения и мощность лазера требуется комплексная оптимизация структуры [5,6,12], просветляющего покрытия [5,6] и фронтальной контактной сетки [6,12] прибора. Просветляющее покрытие должно не только иметь минимум отражения на длине волны излучения лазера, но и стойкость к высоким плотностям подводимой световой мощности.

Поскольку фотопринимающая поверхность модуля может облучаться неравномерно, в его дизайне и конструктивном оформлении следует обеспечить оптимальное с точки зрения минимизации оптических и электрических потерь соответствие формы и размера ФЭП параметрам светового пятна ЛИ [13]. Очевидно, что рассматривать вариант выхода ЛИ за габаритные размеры ФЭП не

имеет смысла, так как это приведет к потерям КПД и возможному дополнительному нагреву конструктивных элементов периферии модуля. Неравномерная облученность с максимумом мощности ЛИ в центре также будет негативно влиять на эффективность многоэлементного приемника и потребует разработки специальных схем коммутации ФЭП [14,15].

Вопросы создания модулей для преобразования мощного, дополнительно сконцентрированного, лазерного (809 и 1064 nm) излучения рассматривались нами ранее в [16,17]. В настоящей работе представлен высокоэффективный фотоэлектрический модуль, оптимизированный для работы с источниками ЛИ (например, [18]) с длиной волны 809–850 nm. Его рабочее напряжение 4 V удовлетворяет номиналу некоторых маломощных аккумуляторов, а большая площадь фоточувствительной поверхности 16 см² отчасти компенсирует угловую расходимость лазерного луча, характерную при передаче мощности через открытое пространство.

1. Конструкция модуля с ФЭП ЛИ

Для формирования модулей применялись два типа однопереходных AlGaAs/GaAs-ФЭП ЛИ, полученных разными технологиями. Для модуля № 1 структуры изготавливались методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии из галлиевых растворов–расплавов ($p-n$ -переход в Al_{0.07}Ga_{0.93}As [6]), а для модуля № 2 — методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) ($p-n$ -переход в GaAs [5]). Размер

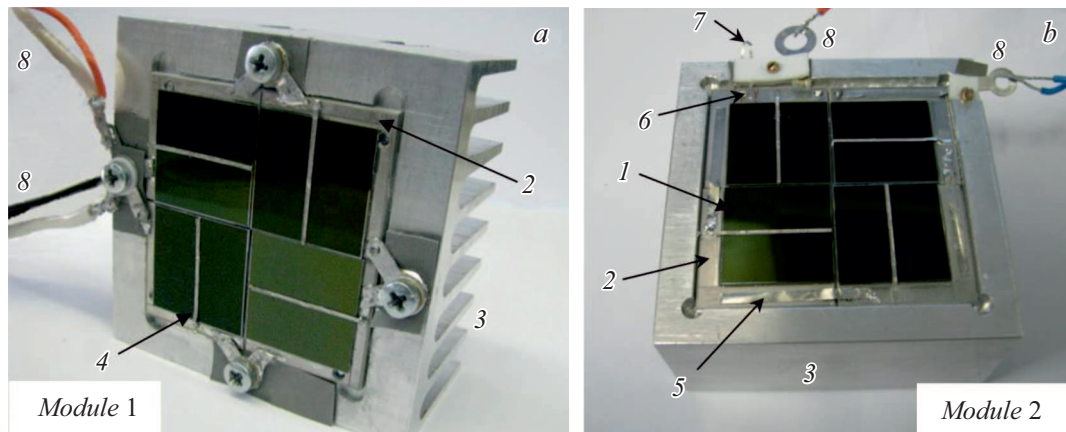


Рис. 1. Конструктивное оформление модулей: 1 — ФЭП; 2 — металлическая плата с диэлектрическим покрытием; 3 — радиатор; 4 — медная лента; 5 — периферийный паяный контакт (медная лента); 6 — термодатчик; 7 — провода термодатчика; 8 — внешние выводы.

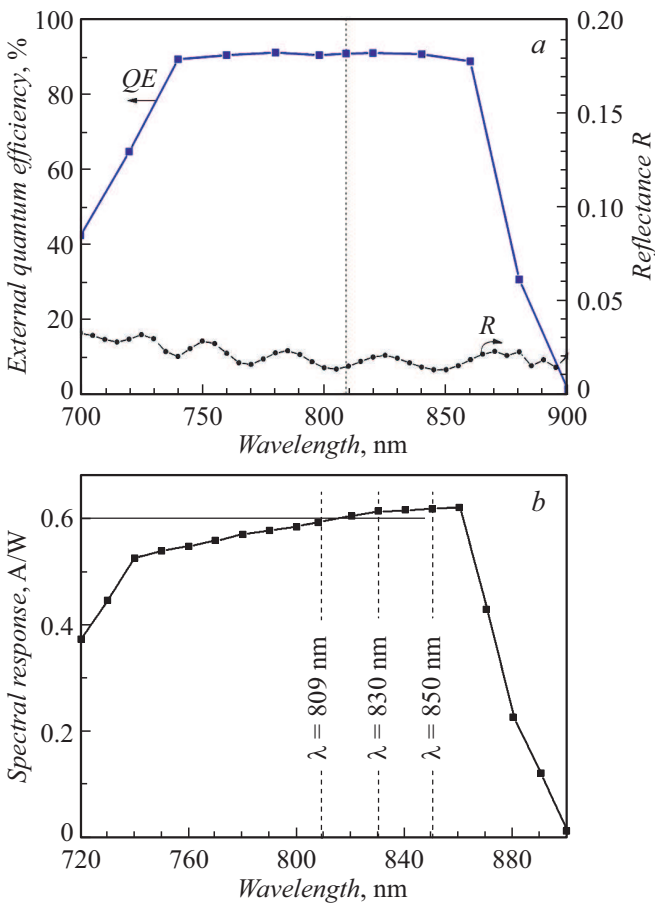


Рис. 2. Внешняя квантовая эффективность и коэффициент отражения (а), а также фоточувствительность (б) ФЭП ЛИ для модуля № 2.

ФЭП в обоих случаях составлял $20 \times 20\text{ mm}$, дизайн контактной сетки одинаков.

Конструктивно модуль представляет собой четыре ФЭП ЛИ (1, рис. 1), смонтированных на индивидуаль-

ных печатных платах с теплопроводностью $2.0\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (2, рис. 1). Применялись платы из сплава алюминия, слоя диэлектрика и медной фольги с лужением. Зазор между питаемыми преобразователями не превышал $0.1\text{--}0.15\text{ mm}$, что обеспечивало максимально эффективную засветку рабочей поверхности. К фронтальным токосборным шинам чипа припаивалась медная луженая лента 4 толщиной 0.1 mm и шириной менее 0.6 mm . Платы с ФЭП устанавливались на общий радиатор из дюралюминия и коммутировались в последовательную электрическую цепь. Предполагалось воздушное охлаждение с использованием радиатора с вертикальными ребрами 3, что одновременно обеспечивало компактность конструкции и автономность при использовании. Все крепежные отверстия вынесены за пределы ФЭП. Модули № 1 (рис. 1, а) и № 2 (рис. 1, б) отличались расположением внешних выводов и шириной периферийных площадок 2, что позволяло апробировать разную последовательность сборки и монтажа. В модуле № 1 все внешние и периферийные контакты паялись до установки фотопреобразователей. При этом за счет узкого поля 2 возрастала вероятность повреждения ФЭП при точечной пайке медной ленты 4 к печатной плате. В усовершенствованном варианте № 2 за счет увеличения периферийной области 2 сокращалось количество промежуточных точечных паяных соединений и упрощался монтаж модуля. Для контроля температуры ФЭП в процессе исследований и эксплуатации модуль № 2 снабжен термодатчиком 6.

Преобразователи и модули на их основе оптимизировались под средний ($1\text{--}20\text{ W}$) уровень подводимой мощности, равномерно распределенной (расфокусированной) по площади ФЭП. При высоких и сверхвысоких облученностях, достигаемых концентрированием световых потоков, будет повышаться вероятность локальной деградации просветляющих покрытий и радиационного перегрева ФЭП, вследствие чего потребуются введение активного охлаждения [19].

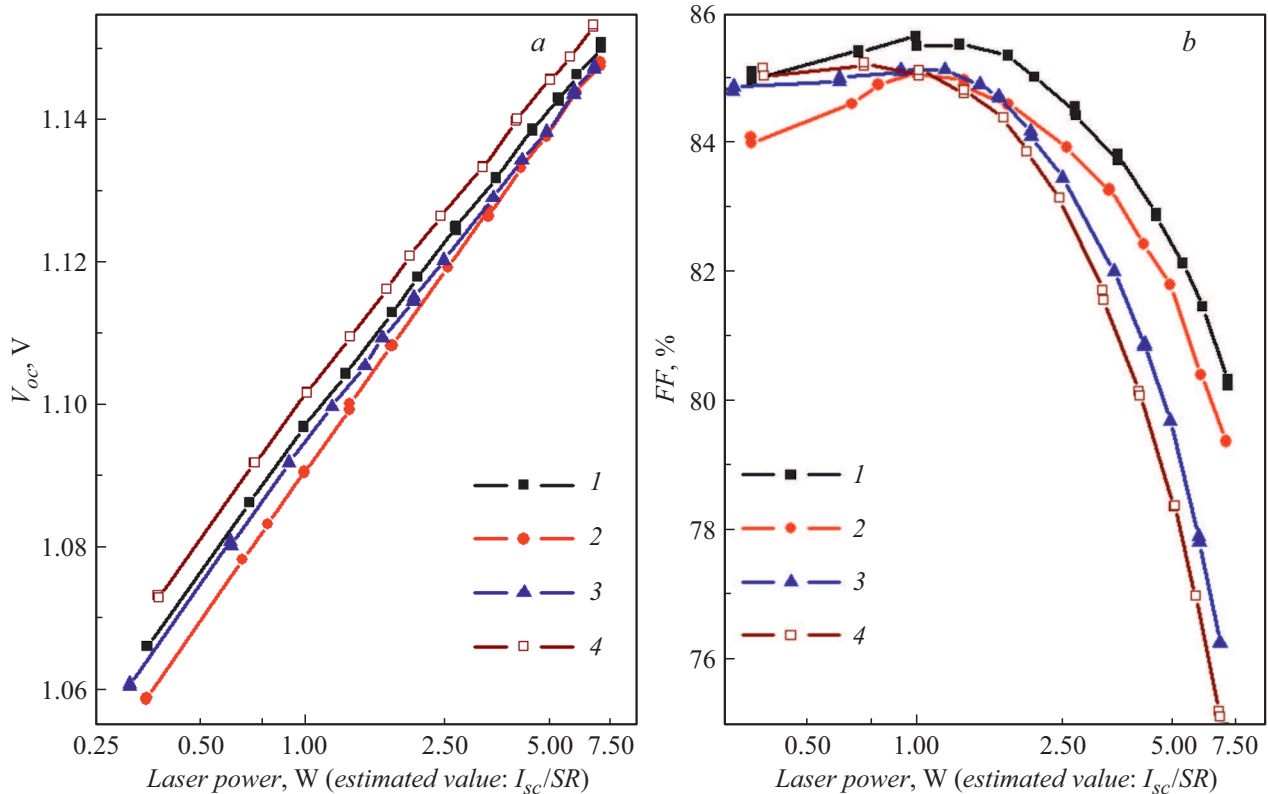


Рис. 3. Зависимости V_{oc} (a) и FF (b) от мощности ЛИ для ФЭП, установленных в экспериментальном модуле № 2: 1–4 — номера ФЭП ЛИ. Оценки приведены для режима равномерного распределения мощности ЛИ по фоточувствительной поверхности ФЭП в модуле.

2. Характеристики модулей ФЭП ЛИ

Спектральные зависимости внешней квантовой эффективности (QE) и фоточувствительности (SR) для ФЭП, используемых в модуле № 2, приведены на рис. 2. Для разработанного варианта ФЭП наблюдается протяженный максимум в диапазоне длин волн $\lambda = 809\text{--}860\text{ nm}$ со значениями $QE = 80\text{--}85\%$ ($SR = 0.59\text{--}0.62\text{ A/W}$), что позволяет использовать его для работы с широко распространенными источниками ЛИ ближнего ИК диапазона ($\lambda = 809, 830$ и 850 nm).

Для модуля с последовательной схемой соединения ФЭП отбирались образцы с максимально близкими значениями SR при $\lambda = 809\text{ nm}$, что обеспечило минимальный уровень потерь на токовом согласовании. Одновременно оценивались параметры ВАХ (ток короткого замыкания I_{sc} , напряжение холостого хода V_{oc} , фактор заполнения нагрузочной характеристики FF) в зависимости от мощности подводимого ЛИ (рис. 3). Регистрация ВАХ производилась в режиме равномерной облученности поверхности ФЭП, создаваемой ксеноновой лампой-вспышкой. Значения мощности ЛИ оценивались с использованием данных по SR в предположении линейности для роста фототока ФЭП с освещенностью [20]: $P_{laser} = I_{sc}/SR$.

Изменение КПД (η) модуля № 2 в зависимости от длины волны и мощности ЛИ приведено на рис. 4, a. При регистрируемом незначительном увеличении SR в диапазоне $\lambda = 809\text{--}850\text{ nm}$ (рис. 2) прирост КПД составляет 3%. Для мощностей лазерного излучения $3\text{--}15\text{ W}$ и $\lambda = 850\text{ nm}$ эффективность модуля превышает 60% в расчете на фоточувствительную поверхность ФЭП (потери излучения на коммутационных шинах и технологических зазорах не учитываются).

Для сравнения на рис. 4, b показаны значения КПД модуля № 1 (кривые для $\lambda = 809$ и 830 nm практически совпадают), а также данные предыдущей, не оптимизированной конструкции на базе однопереходных солнечных элементов с широкозонным окном $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ и $p\text{--}n$ -переходом в GaAs (модуль № 3, четыре ФЭП размером $2 \times 2\text{ cm}$, жидкофазная эпитаксия [16,21]).

3. Применение модуля ФЭП ЛИ

Модуль ориентирован на прием передаваемых через открытое пространство коллимированных потоков ЛИ и может использоваться либо автономно, либо интегрироваться в состав комплексного фотоприемного устройства. Представленные экспериментальные образцы модулей использовались для проверки работоспособности элементов систем беспроводной передачи—прие-

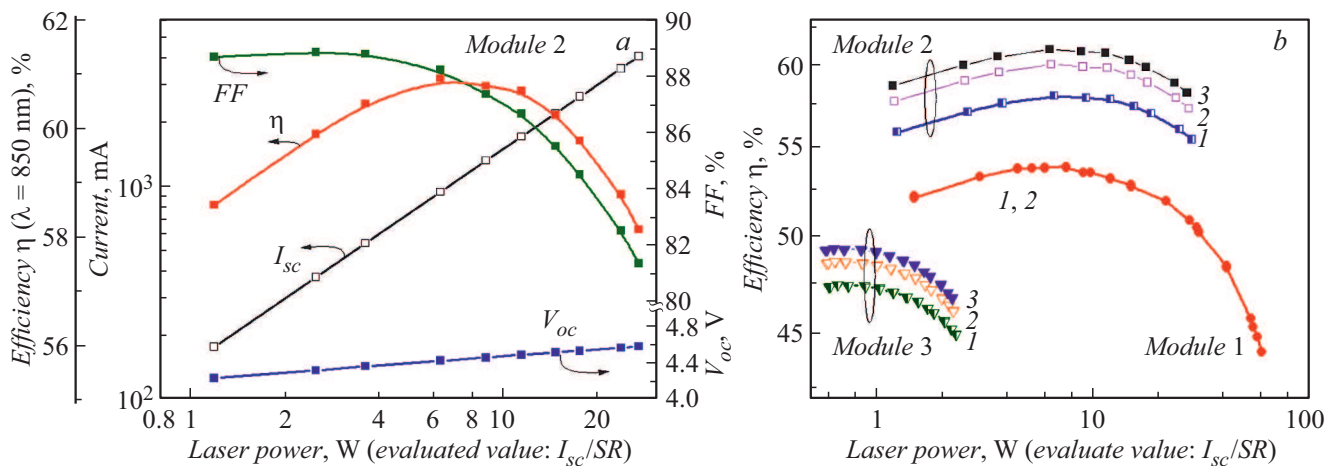


Рис. 4. Зависимости КПД, I_{sc} , V_{oc} и FF от мощности ЛИ при $\lambda = 850\text{ nm}$ для модуля № 2 (a); зависимость КПД от мощности ЛИ для модулей № 1, № 2 и № 3 при различных длинах волн ЛИ: 1 — 809, 2 — 830, 3 — 850 nm (b).

ма–преобразования лазерной энергии и электропитания маломощного потребителя [22]. Из-за значительной расходимости лазерного луча с $\lambda = 809\text{--}850\text{ nm}$ и компактных размеров приемника передача энергии оказалась эффективной лишь на малых (десятки метров) дистанциях от источника ЛИ. Возможное применение модуля — энергоснабжение сверхлегких беспилотных летательных аппаратов [21,23]. Так, в РКК „Энергия“ уже проведены лабораторные эксперименты по запуску на 6 h малогабаритного (< 30 cm) четырехвинтового аппарата вертолетного типа без аккумулятора [23] с фотоэлектрическими модулями подобного вида. По мере увеличения расстояния (до километра и более) размер светового пятна будет существенно (до метрового диаметра) нарастать, что повлечет за собой необходимость увеличения фотоприемной поверхности модуля, а также точности систем наведения и фокусировки луча на мишень. Приемники ЛИ с МОГФЭ-преобразователями будут превосходить батареи с жидкофазными „узкополосными“ (809–830 nm) ФЭП по величине КПД, но при таких крупных габаритах заметно уступят им в стоимости. Структурное исполнение полупроводниковых ФЭП не потребует изменений.

Заключение

Модули № 1 (ЖФЭ-технология) и № 2 (МОГФЭ-технология) из четырех фотопреобразователей общей площадью 16 cm² при работе с лазерным излучением мощностью более 1 W обеспечивают рабочее напряжение более 4 V и могут использоваться для электропитания маломощных устройств. Применение модулей для приема–передачи энергии через открытое пространство эффективно на расстояниях, обеспечивающих попадание светового пятна в площадь приемника.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Oliva E., Dimroth F., Bett A.W. // Prog. Photovolt: Res. Appl. 2008. Vol. 16. P. 289–295.
- [2] Fave A., Kaminski A., Gavard M., Mayet L., Laugier A. // Proc. 25th IEEE Photovoltaic Specialist Conf. 1996. Washington, USA.
- [3] Olsen L.C., Huber D.A., Dunham G., Addis F.W. // Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialist Conf. IEEE, NY. 1991. P. 419–424.
- [4] Shan T., Qi X. // Inf. Phys. Technol. 2015. Vol. 71. P. 144–150.
- [5] Хвостиков В.П., Калужный Н.А., Минтаиров С.А., Сорокина С.В., Потапович Н.С., Емельянов В.М., Тимошина Н.Х., Андреев В.М. // ФТП. 2016. Т. 50. Вып. 9. С. 1242–1246. [Khvostikov V.P., Kaluzhnyy N.A., Mintairov S.A., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Emelyanov V.M., Timoshina N.Kh., Andreev V.M.] // Semiconductors. 2016. Vol. 50. N 9. P. 1220–1224. DOI: 10.1134/S1063782616090128]
- [6] Хвостиков В.П., Сорокина С.В., Потапович Н.С., Хвостикова О.А., Тимошина Н.Х., Шварц М.З. // ФТП. 2018. Т. 52. Вып. 3. С. 385–389. DOI: 10.21883/FTP.2018.03.45626.8740 [Khvostikov V.P., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Khvostikova O.A., Timoshina N.Kh., Shvarts M.Z.] // Semiconductors. 2018. Vol. 52. N 3. P. 366–370. DOI: 10.1134/S1063782618030120]
- [7] Schubert J., Oliva E., Dimroth F., Loekenhoff R., Bett A.W. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2009. Vol. 56. N 2. P. 170–175.
- [8] Helmers H., Wagner L., Garza C., Reichmuth S., Oliva E., Philipps S., Lackner D., Bett A. 17th Intern. Conf. Sensors and Measurement Technol. 2015. Nürnberg, Germany. DOI: 10.5162/sensor2015/D1.4
- [9] Andreev V., Khvostikov V., Kalinovsky V., Lantratov V., Grilikhes V., Rumyantsev V., Shvarts M., Fokanov V., Pavlov A. Proc. WCPEC-3, 2003. Japan. Osaka.

- [10] *Howell J.T., O'Neill M.J., Fork R.L.* // Proc. 5th Wireless transmission conference together with the 4th International Conference on Solar Power from Space, Granada, Spain, 2004. P. 187–194.
- [11] *He T., Yang S.-H., Muñoz M.A., Zhang H.-Ya., Zhao Ch.-M., Zhang Yi-Ch., Xu P.* // Chin. Phys. Lett. 2014. Vol. 31. N 10. P. 104203. DOI: 10.1088/0256-307X/31/10/104203
- [12] *Емельянов В.М., Минтаиров С.А., Сорокина С.В., Хвостиков В.П., Шварц М.З.* // ФТП. 2016. Т. 50. Вып.1. С. 125–131. DOI: 10.1134/S1063782616010085
[*Emelyanov V.M., Mintairov S.A., Sorokina S.V., Khvostikov V.P., Shvarts M.Z.* // Semiconductors. 2016. Vol. 50. N 1. P. 125–131. DOI: 10.1134/S1063782616010085]
- [13] *Богушевская В.А., Жалнин Б.В., Заяц О.В., Масляков Я.Н., Мацак И.С., Никонов А.А., Обручева Е.В., Тугаенко В.Ю.* Известия Академии наук. Энергетика. 2012. Т. 2. Вып. 10.
- [14] *Корнилов В.А., Мацак И.С., Разуваев А.Е., Тугаенко В.Ю.* Патент РФ № 2639738. 22.12.2017.
- [15] *Kalyuzhnyu N.A., Emelyanov V.M., Evstropov V.V., Mintairov S.A., Mintairov M.A., Nahimovich M.V., Salii R.A., Shvarts M.Z.* // AIP Conf. Proceed. 2019. Vol. 2149. P. 050006. <https://doi.org/10.1063/1.5124191>
- [16] *Хвостиков В.П., Сорокина С.В., Потапович Н.С., Хвостикова О.А., Тимошина Н.Х.* // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 5. С. 676–679. DOI: 10.21883/FTP.2017.05.44428.8427
[*Khvostikov V.P., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Khvostikova O.A., Timoshina N.Kh.* // Semiconductors. 2017. Vol. 51. N 5. P. 645–648. DOI: 10.1134/S1063782617050128]
- [17] *Хвостиков В.П., Калюжный Н.А., Минтаиров С.А., Потапович Н.С., Сорокина С.В., Шварц М.З.* // ФТП. 2019. Т. 53. Вып. 8. С. 1135–1139. DOI: 10.21883/FTP.2019.08.48007.9118.
[*Khvostikov V.P., Kalyuzhnyu N.A., Mintairov S.A., Potapovich N.S., Sorokina S.V., Shvarts M.Z.* // Semiconductors. 2019. Vol. 53. N 8. P.1110–1113. DOI: 10.1134/S1063782619080116]
- [18] Электронный ресурс компании „Синтек“
<http://sintecclaser.ru/>
- [19] *Паньчак А.Н., Покровский П.В., Малевский Д.А., Ларионов В.Р., Шварц М.З.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. Вып. 2. С. 26–28. DOI: 10.21883/PJTF.2019.02.47218.17491
- [20] *Garcia I., Rey-Stolle I., Galiana B., Algora C.* // Proc. 4th WCPVE, Hawaii, May 7–12, 2006. P. 830–833.
- [21] *Zayats O.V., Tugaenko V.Yu., Khvostikov V.P.* 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2014, St. Petersburg, Russia.
https://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0274_paper.pdf
- [22] *Karpanov V., Tugaenko V., Marakasov D., Kudryavtsev A.* // Proc. 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2015, Tomsk, Russia, 96801C. DOI: 10.1117/12.2205492
- [23] *Тугаенко В.Ю.* (РКК „Энергия“). Разработка технологии дистанционного энергоснабжения лазерным инфракрасным излучением. Доклад на НТС ГК „Роскосмос“ 15 июня 2017.