



ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ОВФ-ЛАЗЕРЫ ВЫСОКОЙ ЯРКОСТИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

А. В. Авдеев¹, к. т. н.;

А. С. БореЙшо^{2,3}, д. т. н., Boreysho@lsystems.ru;

С. В. Ивакин^{2,3}, Ivakin@lsystems.ru;

А. П. Погода², к. т. н.; А. В. Савин², д. т. н.;

¹ Московский авиационный институт, Москва

² БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова,

Санкт-Петербург

³ ООО "НПП "Лазерные системы", Санкт-Петербург

Лазеры обладают высоким потенциалом использования в космической технике. В статье обоснованы требования и предложены подходы к построению космических лазеров для локационных и лидарных применений, передачи энергии, удаления космического мусора с околоземных орбит, ускорения космических аппаратов. Продемонстрированы достижения в области твердотельных лазеров высокой яркости на основе эффекта обращения волнового фронта (ОВФ) и обоснованы возможности их применения в космической технике.

ВВЕДЕНИЕ

Уже сегодня опыт применения лазеров в космосе охватывает широкий круг задач: лазерные сканирующие устройства используются при стыковке космических аппаратов (КА) [1-3], космические лидары осуществляют дистанционное зондирование Земли и других небесных тел [4-7], околоземный космос контролируется с помощью лазерных локаторов [8-10], реализуются высокоскоростные космические линии лазерной связи [11, 12].

Лазерная аппаратура для решения этих задач представляет собой часть служебной нагрузки КА, имеет относительно низкие массовые и габаритные характеристики, потребляет в среднем не более 100-150 Вт в активном режиме.

В перспективе [13, 14] лазеры востребованы для удаления космического мусора из околоземного пространства [15-17], дистанционного энергоснабжения КА [18, 19], противоастероидной защиты Земли [20], а также ускорения КА [21, 22] для межорбитальных полетов в околоземном пространстве и полетов в дальний космос. Лазерные системы (рис.1) для этих применений требуют обеспечения

HIGH BRIGHTNESS SOLID-STATE PHASE-CONJUGATE LASERS FOR SPACE APPLICATIONS

A. Avdeev¹, candidate of technical science,

A. Boreysho^{2,3}, Boreysho@lsystems.ru,

S. Ivakin^{2,3}, Ivakin@lsystems.ru,

A. Pogoda², candidate of technical science,

A. Savin², doctor of technical science

¹ Moscow Aviation Institute, Moscow

² Ustinov Baltic State University, Saint-Petersburg

³ Laser systems LLC, Saint-Petersburg

The lasers possess a high potential for space technology application. The article substantiates the main requirements as well as suggests approaches to the construction of spaceborne lasers for location and lidar applications, energy transfer, space debris removal from near-earth orbits, and acceleration of space vehicles. The achievements in the field of high brightness solid-state lasers based on the phase conjugation effect are demonstrated, and the feasibility of their application in space technology is substantiated.

INTRODUCTION

Even today, the experience of using lasers in space covers a wide range of tasks: laser scanning devices are used for docking space vehicles [1-3], spaceborne lidars carry out remote sensing of the Earth and other celestial bodies [4-7], near-Earth space is controlled by laser locators [8-10], high-speed space laser links are implemented [11, 12].

Laser equipment for solving these problems is a part of the service load of the space vehicles with relatively low mass and dimensional characteristics, it consumes, on average, no more than 100-150 W in the active mode.

In the long term [13, 14], the lasers are in demand to remove space debris from near-Earth space [15-17], remote power supply of space vehicles [18, 19], anti-asteroid protection of the Earth [20], as well as acceleration of space vehicles [21, 22] for interorbital flights in near-Earth space and flights to the outer space. Laser systems (Fig. 1) for these applications require power supply with a power of more than 100 kW and, in many ways, determine the shape of the carrier vehicle.

питания мощностью свыше 100 кВт и влияют на облик КА-носителя.

Разнообразие задач и широкий диапазон требований к характеристикам излучения вызывают самые разные предложения [23] по возможным типам лазеров для космических применений: от сверхмощных непрерывных химических лазеров [15, 24] до более компактных волоконных [17] и твердотельных [25] лазеров.

В настоящей статье на базе системного метода дана оценка роли и места лазеров в современной космической технике, обоснованы требования и выработаны подходы к построению лазеров для ряда космических задач, а также представлены результаты исследований твердотельных лазеров высокой яркости с использованием эффекта обращения волнового фронта (ОВФ), которые, по мнению авторов, представляют практический интерес для применения в космическом пространстве.

ТРЕБОВАНИЯ К ЛАЗЕРАМ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Перспектива масштабного применения лазеров в космосе связана с тем, что именно в этой среде узконаправленная передача энергии и информации на большие расстояния по лазерному лучу наименее подвержена ограничениям физического характера. Поэтому лазеры будут наиболее востребованы в решении подобных задач.

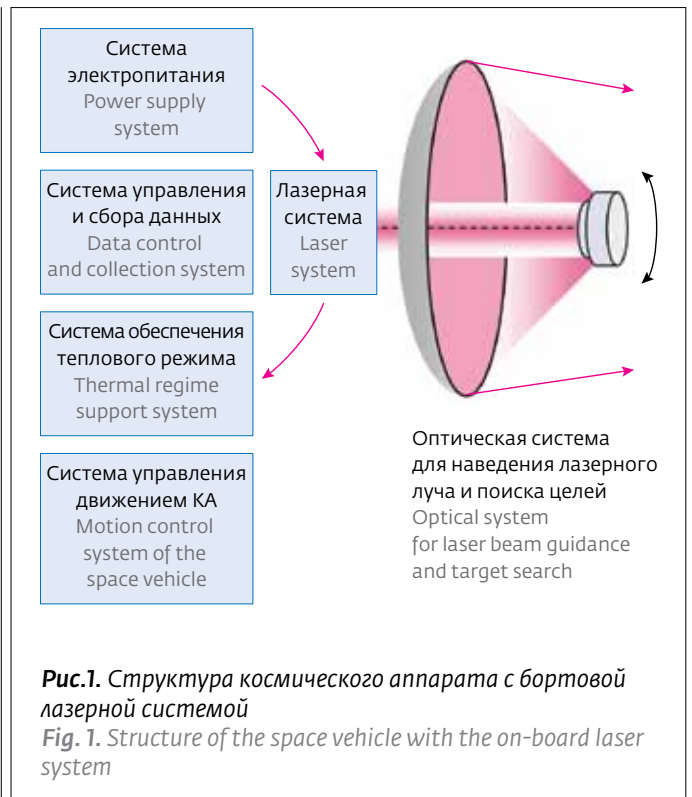
С одной стороны, в космосе отсутствует возмущающее действие оптических неоднородностей атмосферы. Это позволяет при дистанционной фокусировке излучения приблизиться к ограничениям, вызванным дифракционным пределом. Кроме того, отсутствует поглощение излучения по космической трассе.

С другой стороны, для космических задач необходимы лазерные источники высокой яркости. Причина в том, что плотность энергии излучения, доставляемой до зондируемого объекта (объема), обратно пропорциональна второй степени величины дальности:

$$ED = (4 \cdot E_p) / (\pi \theta^2 \cdot L^2),$$

$$\theta = M^2 \cdot 1,06 \cdot \lambda / d_t,$$

где ED – плотность энергии [Дж/м²] излучения на мишени, E_p – энергия импульса, L – дистанция до объекта локации, θ – расходимость лазерного излучения по половинному уровню энергии, M² – параметр оптического качества излучения,



A variety of problems and a wide range of requirements for radiation characteristics cause a variety of designs [23] of possible types of lasers for space applications: from high-power continuous chemical lasers [15, 24] to more compact fiber [17] and solid-state [25] lasers.

In this article, based on the system method, the role and place of lasers in modern space technology are evaluated, the requirements and approaches to the construction of lasers for a number of space applications are justified, and the results of studies of high brightness solid-state phase-conjugate lasers which, in the opinion of the authors, are of practical interest for application in outer space, are given.

LASER REQUIREMENTS FOR SPACE APPLICATIONS

The potential of a large-scale application of lasers in space is due to the fact that it is in this medium that the narrowly directed transmission of energy and information over long distances along the laser beam is the least exposed to physical limitations. Therefore, lasers will be most in demand in solving similar problems.

On the one hand, there is no disturbing effect of the optical inhomogeneities of the atmosphere in space. This makes it possible, with distance focusing of the radiation, to approach the limitations caused



λ – длина волны лазера, d_t – диаметр передающего телескопа с заполненной апертурой.

В задачах локации малых удаленных объектов энергия E_r рассеянного объектом локации излучения, регистрируемого приемной системой лазерного локатора, обратно пропорциональна дальности в четвертой степени:

$$E_r = (E_p \cdot A \cdot S_{eff} \cdot d_r^2) / (2\pi \cdot \theta^2 \cdot L^4),$$

где A – альbedo объекта локации, S_{eff} – эффективное сечение отражения, d_r – диаметр приемной апертуры.

Таким образом, на больших расстояниях (100 км и более) основным требованием к лазерам для работы в космосе является обеспечение одновременно высокой энергии и минимально возможной расходимости лазерного пучка. Иными словами, необходимы источники лазерного излучения высокой яркости [23]. В зависимости от задачи предъявляют требования к энергетическим, временным, пространственным и спектральным параметрам космического лазера.

ЛАЗЕРЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛИДАРОВ

Лазерные локационные и лидарные системы широко используются [14] на Земле и в космосе, где, как правило, применяют лазерные источники [4, 6–8, 25] с энергией импульса 0,1–10 Дж, длительностью 0,1–10 нс, частотой следования 1–100 Гц, пиковой мощностью свыше 1 МВт и оптическим качеством излучения $M^2 \approx 1,1–1,5$.

Лазеры для передачи энергии в космосе

Подавляющее большинство научных результатов в области дистанционной передачи электрической энергии с помощью направленного электромагнитного излучения относится к проблемам создания больших космических солнечных электростанций (КСЭС) [26], преобразующих солнечную энергию в электрическую с последующей ее доставкой на Землю посредством лазерного или СВЧ-излучения.

На текущий момент оценки капитальных и операционных затрат создания КСЭС с соответствующей наземной инфраструктурой не позволяют говорить о какой-либо стоимости киловатт-часа, полученного таким образом на Земле. В то же время сама технология КСЭС является вполне конкурентоспособной для создания тяжелой космической платформы энерговооруженностью в десятки и сотни киловатт. А в сочетании с мощной лазерной системой высокой яркости эта технология подходит для дистанцион-

by the diffraction limit. Furthermore, there is no absorption of radiation along the space path.

On the other hand, high brightness laser sources are needed for space applications. The reason is that the energy density of radiation delivered to the probed object (scope) is inversely proportional to the second power of the range value:

$$ED = (4 \cdot E_p) / (\pi \theta^2 \cdot L^2),$$

$$\theta = M^2 \cdot 1,06 \cdot \lambda / d_t,$$

where ED is the energy density [J/m^2] of the radiation on the target, E_p is the energy of the pulse, L is the distance to the object of detection, θ is the divergence of the laser radiation at half the energy level, M^2 is the parameter of the optical quality of the radiation, λ is the laser wavelength, d_t is the diameter of transmitting telescope with filled aperture.

In the problems of locating small remote objects, the energy E_r of the radiation scattered by the object detected by the receiving laser locator system is inversely proportional to the range in the fourth power:

$$E_r = (E_p \cdot A \cdot S_{eff} \cdot d_r^2) / (2\pi \cdot \theta^2 \cdot L^4),$$

where, A is the albedo of the detection object, S_{eff} is the effective reflection cross-section, and d_r is the diameter of the receiving aperture.

Thus, at long distances (over 100 km), the main requirement for lasers for space applications is to provide simultaneously high energy and the minimum possible divergence of the laser beam. In other words, the high brightness sources of laser radiation are needed [23]. Depending on the task, the requirements are imposed on the energy, time, spatial and spectral parameters of the space laser.

LASERS FOR SPACEBORNE LIDARS

Laser location and lidar systems are widely used [14] on the Earth and in space, where laser sources are usually used [4, 6–8, 25] with a pulse energy of 0.1–10 J, duration 0.1–10 ns, repetition frequency 1–100 Hz, peak power over 1 MW and optical quality of radiation $M^2 \approx 1.1–1.5$.

Lasers for energy transmission in space

The vast majority of scientific results in the field of remote transmission of electric energy by means of directed electromagnetic radiation are related to the problems of creating large space solar power plants (SSPP) [26], transforming solar energy into electrical



ного энергоснабжения перспективных космических потребителей.

Для этих космических задач рационально использовать непрерывные твердотельные, в т.ч. волоконные и полупроводниковые, лазеры, обеспечивающие приемлемую эффективность всей энергетической цепи [18, 19].

Лазеры для удаления космического мусора и ускорения КА

Неуклонный рост количества объектов, классифицируемых как космический мусор (КМ), в условиях все более интенсивного освоения околоземного космоса уже сегодня стал критическим. Он угрожает безопасности и эффективности космических полетов [27].

Перспективным и едва ли не единственным реальным методом масштабного удаления мелкого космического мусора с околоземных орбит является дистанционное воздействие на КМ лазерным излучением в абляционном режиме. В результате такого воздействия объекту КМ придается реактивный импульс, корректирующий его траекторию движения с целью предотвращения столкновений КМ с действующими КА и между собой. Он также уводит КМ либо на орбиты захоронения, либо – спуска

energy and its subsequent delivery to the Earth by means of laser or microwave radiation.

At the current moment, the estimates of the capital and operating costs of creating SSPPs with the corresponding ground infrastructure did not allow us to talk about how a reasonable cost of kW-h thus obtained on the Earth. At the same time, the SSPP technology is quite competitive for the creation of a heavy space platform with an energy capacity of tens and hundreds of kilowatts, and in combination with a powerful high brightness laser system – for remote power supply to potential spaceborne consumers.

For these space applications, it is rational to use continuous solid-state lasers, including fiber and semiconductor ones, that provide an acceptable efficiency of the entire energy circuit [18, 19].

Lasers for removing space debris and space vehicles acceleration

Steady growth in the number of objects classified as space debris (SD), in conditions of increasingly intensive development of near-Earth space, has already become critical today. It threatens the safety and efficiency of space flights. [27]

A far-reaching and perhaps the only real method for large-scale removal of small debris from near-

в плотные слои земной атмосферы с последующим сгоранием.

Предварительные оценки размещения лазера со средней мощностью в 25 кВт на космической платформе показывают приемлемую результативность очистки низких околоземных орбит от мелкого космического мусора. Лазерная система с длиной волны ≈ 1 мкм, энергией в импульсе 500 Дж, длительностью импульса 10^{-8} с, передающим телескопом диаметром 1,5 м в результате однократного абляционного воздействия на КМ длительностью 10 с при частоте следования импульсов 50 Гц обеспечит замедление мелкого КМ с габаритно-массовым соотношением ≈ 10 см²/г на $\Delta V \approx 300$ км/ч. Для такого же замедления КМ с соотношением ≈ 1 см²/г требуется несколько сеансов воздействия лазерными импульсами общим количеством ≈ 5000 .

Таким образом, для абляционного воздействия на космический мусор рассматриваются [15, 16] лазеры средней мощностью свыше 25 кВт, генерирующие импульсы с энергией 0,1-1,5 кДж, длительностью 0,1-10 нс, частотой следования 50-100 Гц, пиковой мощностью свыше 1 ГВт и оптическим качеством излучения $M^2 \approx 1,2-2,5$.

Дальнейшее повышение энергии в импульсе открывает возможности по абляционному замедлению опасных астероидов [19] с целью предотвращения их столкновения с Землей, а также абляционному ускорению КА [21, 22] с целью обеспечения межорбитального маневрирования в околоземном пространстве и дальних космических полетов.

Твердотельные лазеры с обращением волнового фронта

Достижение высокой яркости излучения лазера, а значит высокой энергии в импульсе при относительно малой расходимости, возможно путем обращения волнового фронта (ОВФ). В течение последних десятилетий существенно возросло разнообразие твердотельных лазеров на основе эффекта ОВФ, обладающих уникальным набором энергетических, временных, пространственных и спектральных характеристик излучения. Ключевым отличием лазеров с ОВФ от аналогов является полученная в результате самовоздействия, а не искусственно сформированная при помощи дополнительных оптических элементов селекция продольных и поперечных мод в сочетании с самомодуляцией добротности резонатора. Соответствующий выигрыш в массовых и габаритных характеристиках лазеров с ОВФ повышает привлекательность их использования в космическом пространстве.

Earth orbit is remote SD exposure to laser radiation in the ablation regime. As a result of such an exposure, the SD object is given a reactive pulse that corrects its trajectory in order to prevent collisions of the SD with the active space vehicle and with each other. It also removes SD to either the burial orbit, or to dense layers of the Earth's atmosphere with subsequent combustion.

Preliminary estimates of the laser accommodation with an average power of 25 kW on a space platform indicate an acceptable performance of removing small debris from the low near-Earth orbits. A laser system with a wavelength of ~ 1 μ m, a pulse energy of 500 J, a pulse duration of 10^{-8} s, a transmitting telescope with a diameter of 1.5 m, as a result of a single 10 s ablative effect on SD with a pulse repetition rate of 50 Hz, will decelerate small SD with the overall mass ratio ~ 10 cm²/g at $\Delta V \sim 300$ km/h. For the same deceleration of the SD with a ratio of ~ 1 cm²/g, several sessions of laser pulses with a total amount of ~ 5000 are required.

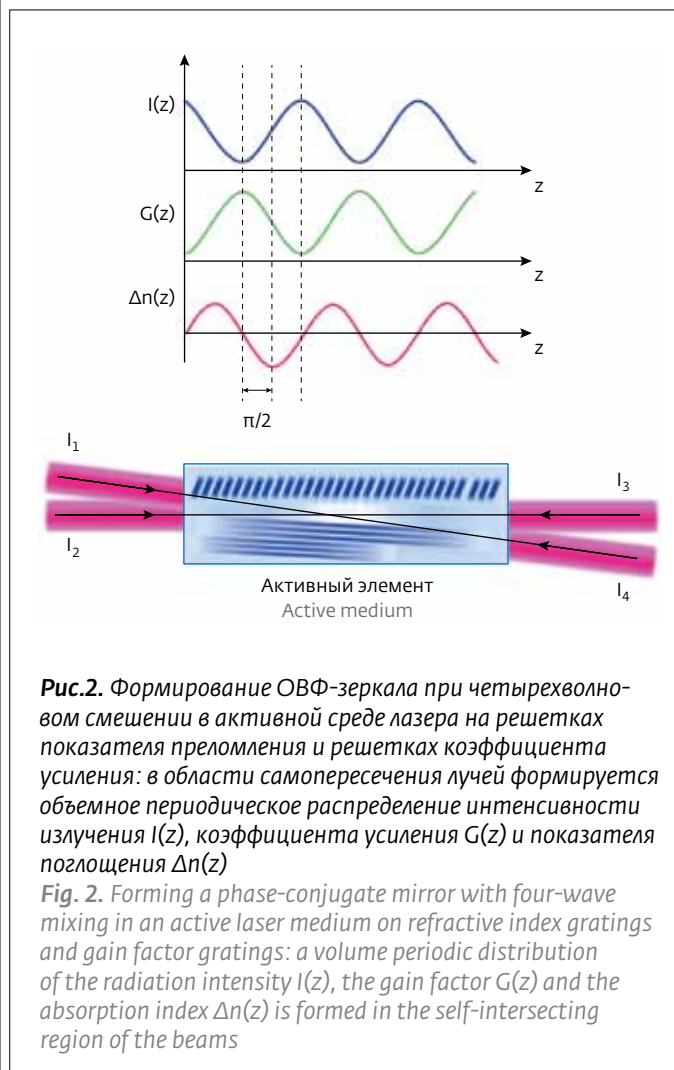


Рис.2. Формирование ОВФ-зеркала при четырехволновом смешении в активной среде лазера на решетках показателя преломления и решетках коэффициента усиления: в области самопересечения лучей формируется объемное периодическое распределение интенсивности излучения $I(z)$, коэффициента усиления $G(z)$ и показателя поглощения $\Delta n(z)$

Fig. 2. Forming a phase-conjugate mirror with four-wave mixing in an active laser medium on refractive index gratings and gain factor gratings: a volume periodic distribution of the radiation intensity $I(z)$, the gain factor $G(z)$ and the absorption index $\Delta n(z)$ is formed in the self-intersecting region of the beams



Распространение излучения в резонаторе лазера при самопересечении пучков в активной нелинейной среде третьего порядка приводит к изменению ее оптических свойств. В результате четырехволнового смещения в ответ на объемное периодическое распределение интенсивности излучения в области пересечения лучей формируются решетки показателя преломления, показателя поглощения и коэффициента усиления (рис.2). Дифракция на решетках коэффициента усиления приводит к энергообмену между пучками, что позволяет создавать самонакачивающееся ОВФ-зеркало, поддерживающее положительную обратную связь.

Реализация эффекта ОВФ путем смещения волн в активной среде может осуществляться в любых нелинейных средах третьего порядка. В средах с высоким сечением поглощения генерация излучения ОВФ-лазера формируется за относительно малое число проходов по резонатору и близка по пространственным и спектральным характеристикам к спонтанной люминесценции, так как недостаточное число циклов перезаписи решетки приводит к недостаточной селекции мод. С другой стороны, в средах с низким сечением поглощения и высоким порогом генерации будет выше коэффициент усиления, необходимый для развития генерации.

Thus, lasers with an average power exceeding 25 kW, generating pulses with an energy of 0.1–1.5 kJ, a duration of 0.1–10 ns, a repetition frequency of 50–100 Hz, a peak power of more than 1 GW and an optical quality of radiation $M^2 \sim 1.2\text{--}2.5$ are considered for ablation exposure on space debris [15, 16].

A further increase in energy in the pulse opens the possibility of ablation deceleration of dangerous asteroids [19] in order to prevent their collision with the Earth, as well as ablation acceleration of the space vehicles [21, 22] in order to provide interorbital maneuvering in the near-Earth space and long-range space flights.

Solid-state phase-conjugate lasers

Achieving high brightness of laser radiation, and therefore high energy in the pulse with a relatively small divergence, is possible by phase conjugation. During the last decades, the variety of solid-state lasers based on the phase conjugation effect, which has a unique set of energy, temporal, spatial and spectral characteristics of radiation, has increased significantly. The key difference between lasers with phase conjugation from the analogs is the selection of longitudinal and transverse modes resulting from self-Q-switching of the resonator, obtained as a result

При достаточно высокой энергии накачки возможно получение генерации без выходного зеркала резонатора ОВФ-лазера.

Рациональным решением является использование доступной среды: YAG:Nd³⁺ с относительно низким сечением поглощения при одновременном повышении эффективности резонатора путем увеличения количества самопересечений лучей в активной среде и записи дополнительных решеток коэффициента усиления. Совместная работа большого количества решеток приводит к повышению эффективности ОВФ и улучшению параметров излучения.

В лазерах на основе эффекта ОВФ устранение традиционного падения качества излучения при увеличении энергетических параметров не происходит, благодаря росту дифракционной эффективности решеток коэффициента усиления, пропорциональной контрасту V решетки:

$$V=2 \cdot (I_1 \cdot I_2)^{0,5} / (I_1 + I_2),$$

где I_1, I_2 – интенсивности записывающих решетку пучков.

В [28] проведено сравнение характеристик излучения YAG:Nd³⁺ ОВФ-лазера с диодной мульткиловаттной накачкой при различных конфигурациях петлевого резонатора (рис.3). Показано, что увеличение количества петель с двух до четырех приводит к двукратному росту энергии в импульсе при равных энергиях накачки за счет роста количества решеток и их дифракционной эффективности.

В сочетании с компенсацией искажений за счет распространения излучения с обращенным волновым фронтом это приводит к парадоксальному росту качества излучения при повышении мощности. Кроме того, динамические решетки коэффициента усиления производят угловую селекцию излучения, что позволяет получать излучение с расходимостью, близкой к дифракционному пределу. Так в режиме свободной генерации энергия в цуге импульсов в зависимости от конфигурации резонатора достигала уровня 0,5–1,25 Дж при параметре качества излучения $M^2=1,15-1,5$, причем рост энергии в цуге сопровождался ростом оптического качества.

Поскольку дифракционная эффективность решетки коэффициента усиления напрямую зависит от интенсивностей интерферирующих пучков, в ОВФ-лазере возникает конкуренция продольных мод, приводящая к естественной селекции единственной частотной моды. Это позволяет получать одиночные импульсы с шириной полосы равной ширине одной моды 350 МГц при использо-

of self-action, rather than artificially formed with the help of additional optical elements. The corresponding gain in the mass and dimensional characteristics of phase-conjugated lasers enhances the attractiveness of their use in outer space.

The propagation of radiation in a laser resonator with self-intersecting beams in an active third-order nonlinear medium leads to a change in its optical properties. As a result of four-wave mixing, gratings of the refractive index, the absorption index and the gain factor are formed in response to the volume periodic distribution of the radiation intensity in the region of intersection of the beams (Fig. 2). Diffraction on the gratings of the gain leads to an energy exchange between the beams, which makes it possible to create a self-pumping PC mirror that supports positive feedback.

The effect of phase conjugation by mixing waves in an active medium can be implemented in any nonlinear medium of the third order. In the media with a high absorption cross section, the generation of the radiation from a PC laser is formed by a relatively small number of passes through the resonator and is close in spatial and spectral characteristics to spontaneous luminescence, since an insufficient number of cycles of the grating re-recording leads to insufficient mode selection. On the other hand, in the media with a low absorption cross section and a

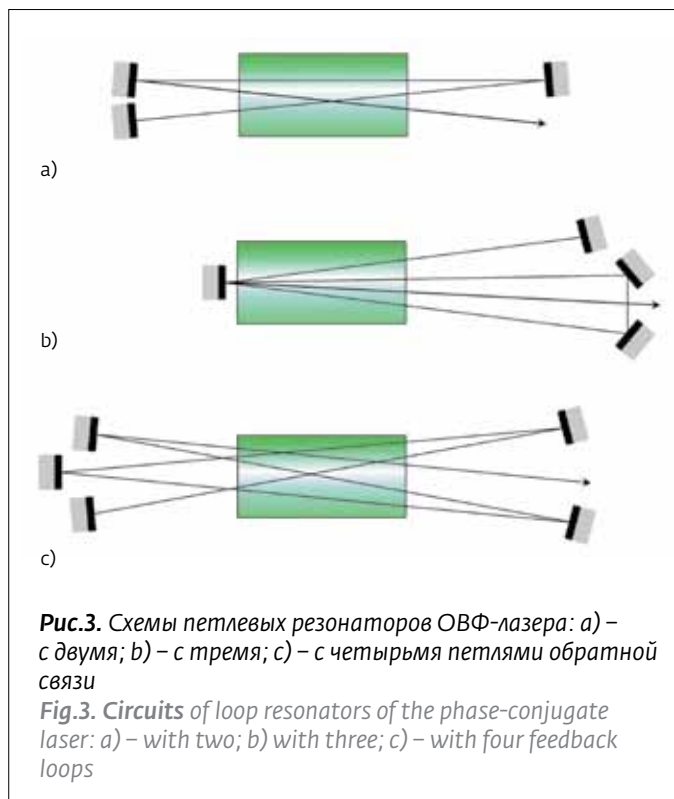


Рис.3. Схемы петлевых резонаторов ОВФ-лазера: а) – с двумя; б) – с тремя; в) – с четырьмя петлями обратной связи

Fig.3. Circuits of loop resonators of the phase-conjugate laser: а) – with two; б) with three; в) – with four feedback loops



вании петлевого резонатора (вместо 30 ГГц – ширины полосы многомодовой генерации лазера с резонатором Фабри-Перо). При этом ширина полосы генерации цуга импульсов остается равной ширине полосы генерации лазера с резонатором Фабри-Перо, так как усиление различных продольных мод имеет случайный характер, и доминирующая частота случайным образом выбирается в диапазоне полосы усиления.

Использование выходного зеркала в качестве источника дополнительной обратной связи приводит к росту энергии в импульсе, но влияет на спектральные свойства, в этом случае селекции продольных мод не происходит. Использование дополнительных внутрирезонаторных селекторов, таких как стационарная брэгговская решетка или интерферометр Саньяка, приводит к дополнительной селекции продольных мод, что ведет к повышению эффективности решеток.

Поскольку в ОВФ-лазере развитие импульса и усиление обратной связи происходят по мере роста интенсивности внутрирезонаторных пучков, происходит самомодуляция добротности, что приводит к сокращению длительности импульса излучения с 400–500 нс до 200–300 нс и росту пиковой мощности излучения.

В случае недостаточной самомодуляции добротности резонатора, возникающей за счет эффекта ОВФ, возможно использовать пассивные насыщающиеся поглотители. Они позволяют повышать пиковую мощность генерируемого излучения не только за счет собственной модуляции порога генерации, но и за счет влияния на интенсивность внутрирезонаторных пучков, записывающих решетки коэффициента усиления. Вариация коэффициента начального пропуска затвора позволяет менять пиковую мощность и энергию в импульсе в пределах нескольких порядков.

В [29] показано, что использование насыщающегося поглотителя YAG:Cr⁴⁺ с коэффициентом пропуска 5% в лазере YAG:Nd³⁺ с диодной мульткиловаттной накачкой и петлевым резонатором позволяет получать импульсы с пиковой мощностью до 30 МВт. Вариация начального пропуска затворов YAG:Cr⁴⁺ и GSGG:Cr⁴⁺ в диапазоне 5–55% позволяет изменять пиковую мощность в импульсе от 250 кВт до 30 МВт при изменении энергии в цуге генерации в пределах 20% (рис.4). Столь значительный диапазон пиковой мощности излучения позволяет осуществлять одинаковое воздействие на расстояниях, отличающихся на несколько порядков, без существенного изменения теплового режима работы лазера.

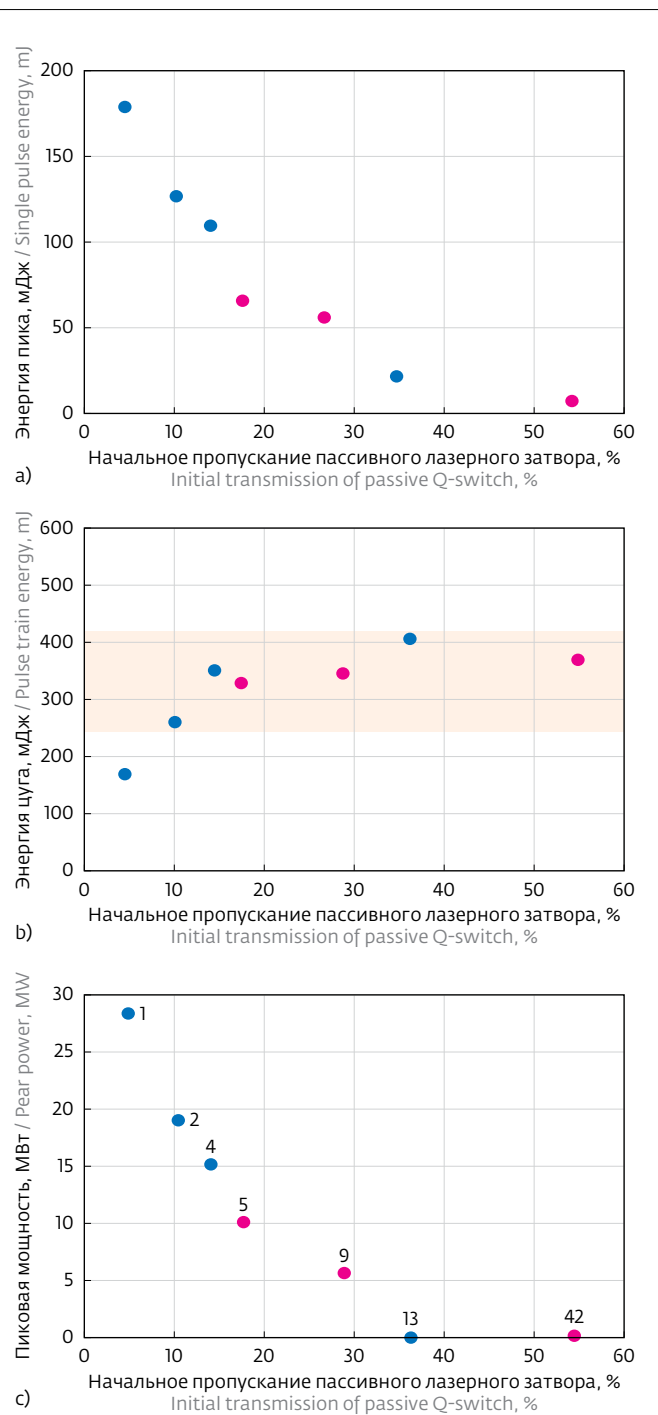


Рис.4. Энергетические и временные зависимости: (а) – энергии импульса в цуге, (б) – энергии цуга; (с) – пиковой мощности генерации от коэффициента начального пропуска пассивного лазерного затвора (YAG:Cr⁴⁺ – квадраты, GSGG:Cr⁴⁺ – круги, число в квадрате обозначает количество пиков в цуге)
Fig.4. Energy and temporal dependencies: (a) – pulse energy in the train, (b) – train energy; (c) – peak lasing power from the passive laser gate initial pass-through factor (YAG:Cr⁴⁺ – squares, GSGG:Cr⁴⁺ – circles, the number in squares indicates the number of peaks in the train)



Дальнейшее повышение энергии в импульсе возможно осуществить путем повышения энергии накачки или путем сложения, в том числе когерентного, излучения нескольких лазерных каналов. В [30] проведено исследование характеристик излучения YAG:Nd³⁺ лазера на основе квантрона повышенной мощности. В режиме пассивной модуляции добротности с пересечением пучков в насыщающемся поглотителе LiF:F₂ с начальным пропусканием 10% получены цуги импульсов с энергией 2,55 Дж и параметром качества излучения $M^2 \leq 1,2$ при расходимости 0,35 мрад и пространственной яркости $7 \cdot 10^{14}$ Вт·см⁻²·ср⁻¹. Пиковая мощность одночастотных импульсов превысила 21 МВт при их энергии 230 мДж. Увеличение пиковой мощности излучения ОВФ-лазера может быть достигнуто путем активной модуляции добротности.

Таким образом, лазеры с обращением волнового фронта являются инструментом с возможностью вариации энергетических и спектральных характеристик в широких пределах. Это обеспечивает универсальность лазерной установки для широкого круга прикладных задач и возможность быстрой смены параметров генерации как в рамках одного, так и разных приложений.

high generation threshold, the amplification factor necessary for the development of lasing will be higher. At a sufficiently high pump energy, it is possible to generate lasing without an output mirror of a PC laser resonator.

The rational solution is to use the available medium: YAG:Nd³⁺ with a relatively low absorption cross section, while increasing the efficiency of the resonator by increasing the number of self-intersections of the beams in the active medium and recording additional gratings. The joint operation of a large number of gratings leads to an increase in the efficiency of phase conjugation and an improvement in the radiation parameters.

In phase-conjugate lasers, the traditional decrease in the quality of radiation with increasing energy parameters does not occur, due to the increase in the diffraction efficiency of the gratings of the gain factor, proportional to the contrast V of the grating:

$$V = 2 \cdot (I_1 \cdot I_2)^{0,5} / (I_1 + I_2),$$

where I_1, I_2 are the intensities of the beams recording the grating.

In [28], the characteristics of the YAG:Nd³⁺ PC laser radiation with diode multi-kilowatt pumping were

Варианты лазеров для космических задач

Options of lasers for space applications

Наименование космической задачи Space application	Типы лазеров / Kinds of Lasers			
	Непрерывные химические и твердотельные лазеры Continuous Chemical and solid-state* lasers	Импульсные химические и твердотельные лазеры Pulse Chemical and solid-state* lasers	Импульсные твердотельные лазеры с ОВФ Pulse Solid-state phase-conjugate lasers	Импульсные высоко-энергетические твердотельные лазеры с ОВФ Pulse high power solid-state phase-conjugate lasers
Передача энергии Energy transmission	рац. ration.	н/р irrat.	н/р irrat.	н/р irrat.
Лазерная локация Laser detection	н/р irrat.	рац. ration.	рац. ration.	возм. poten.
Лидарные приложения Lidar applications	н/р irrat.	рац. ration.	рац. ration.	возм. poten.
Абляционное удаление КМ Ablative removal of SD	н/р irrat.	возм. poten.	возм. poten.	рац. ration.
Абляционное ускорение КА Ablation acceleration	н/р irrat.	возм. poten.	возм. poten.	рац. ration.

Примечания: рац. - рациональный вариант; возм. - возможный; н/р - нерациональный вариант; * - в том числе волоконные и полупроводниковые лазеры

Notes: ration. - rational option; poten. - potential; irrat. - irrational option; * - including fiber and semiconductor lasers



ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Твердотельные лазеры, в том числе волоконные и полупроводниковые, остаются в фокусе внимания разработчиков космической лидарной и локационной техники благодаря приемлемой энергетической эффективности, опыту эксплуатации в космических условиях, относительной простоте и удобству в работе.

Мощность твердотельных лазеров ограничена лучевой стойкостью их активных сред, предельные размеры которых ограничены технологиями роста (изготовления) лазерных кристаллов. Лимитирующей также является проблема усиленного спонтанного излучения, особенно актуальная в случае использования широкоапертурных дисковых активных элементов. Критическое значение имеют вопросы обеспечения тепловых режимов.

Высокую яркость излучения в твердотельных лазерах достигают, применяя архитектуру "задающий генератор + усилитель". Альтернатива этому решению может быть реализована в твердотельном лазере с помощью эффекта ОВФ при четырехволновом смешении. Твердотельные ОВФ-лазеры обеспечивают возможность варьирования характеристик

сравнено с различными конфигурациями контура резонатора (Fig. 3). Показано, что увеличение числа контуров от двух до четырех приводит к двукратному увеличению энергии в импульсе при равных энергиях накачки из-за увеличения числа решетчатых элементов и их дифракционной эффективности.

В сочетании с компенсацией искажений из-за распространения фазо-сопряженной излучения, это приводит к парадоксальному увеличению качества излучения с ростом мощности. Кроме того, динамические решетки производят угловую селекцию излучения, что позволяет получить излучение с расхождением, близким к дифракционному пределу. Таким образом, в режиме свободной работы, энергия в импульсе, в зависимости от конфигурации резонатора, достигла уровня 0.5-1.25 Дж с параметром качества излучения $M^2=1.15-1.5$, в то время как энергетический рост импульса сопровождался увеличением оптического качества.

Поскольку эффективность дифракции решетки зависит непосредственно от интенсивности взаимодействующих лучей, в фазо-сопряженном лазере возникает конкуренция продольных мод, что приводит к естественной селекции одной частотной моды. Это позволяет получить одиночные импульсы с



излучения в широких пределах при сохранении высокой яркости, что позволяет оптимальным образом их использовать в лидарной и локационной космической технике.

Долгое время считалось, что твердотельные лазеры с большой величиной средней мощности, в том числе способные обеспечить требуемые для абляционного воздействия импульсно-периодические режимы работы с экстремально высокими энергиями в импульсе, имеют плохое оптическое качество излучения. Этот недостаток не позволял рассматривать их для применения на больших дистанциях.

Однако, как было показано [31–34] в последнее время, получение высокой яркости при высокой средней мощности лазерного излучения становится достижимой задачей, если использовать несколько физических явлений: ОВФ (для компенсации искажений волнового фронта в усилительном каскаде) и когерентное сложение излучения нескольких каналов (позволяющее повысить суммарную яркость излучения пропорционально квадрату количества лазерных каналов).

Современные подходы к когерентному сложению заключаются в фазировании и синхронизации излучения отдельных лазерных каналов путем реализации эффекта ОВФ при вынужденном рассеянии Манделъштама-Бриллюэна или четырехволновом смещении в лазерной активной среде. Варианты лазеров для космических задач сведены в таблицу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Твердотельные ОВФ-лазеры высокой яркости остаются актуальным направлением исследований, в том числе в интересах практических применений в космической технике для решения лидарных и локационных задач, передачи энергии, абляционного удаления космического мусора с околоземных орбит и абляционного ускорения космических аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kolb F.M. et al. The LIRIS-2 3D Imaging LIDAR on ATV-5 – Guidance, Navigation, and Control 2016. – Advances in astronautical sciences, 2016, v.157. p.1023–1028.
2. Ruel S. et al. On-Orbit Testing of Target-less TriDAR 3D Rendezvous and Docking Sensor. – Proc. of the 10th i-SAIRAS, 2010, p.15–21.
3. Зубов Н.Е. и др. Оптимизация массы и энергопотребления лазерных локационных систем для управления сближением и стыковкой космических аппаратов. – Космическая техника и технологии, 2014, т. 3, вып. 6, с. 39–42.
4. Winker D.M. et al. The CALIPSO Mission: results and progress. – Proc. SPIE. 2010, v.7832, p. 78320B1–7.

a bandwidth equal to the width of one 350 MHz mode using a loop resonator (instead of 30 GHz, the bandwidth of multimode laser generation with a Fabry-Perot resonator). In this case, the bandwidth of the pulse train generation remains equal to the width of the laser generation band with the Fabry-Perot resonator, since the amplification of various longitudinal modes has a random character and the dominant frequency is randomly selected in the amplification band range.

The use of the output mirror as a source of additional feedback leads to an increase in the energy in the pulse, but it affects the spectral properties, in this case there is no selection of longitudinal modes. The use of additional intracavity selectors, such as the stationary Bragg grating or the Sagnac interferometer, leads to an additional selection of longitudinal modes, which leads to an increase in the efficiency of the gratings.

Since pulse development and feedback enhancement occur in the phase-conjugate laser as the intensity of the intra-resonator beams increases, self-Q-switching occurs, which leads to a shortening of the radiation pulse duration from 400–500 ns to 200–300 ns and an increase in the peak radiation power.

In the case of insufficient self-Q-switching of the resonator, which arises from the PC effect, it is possible to use passive saturable absorbers. They make it possible to increase the peak power of the generated radiation, not only due to the intrinsic modulation of the generation threshold, but also due to the influence on the intensity of intracavity beams recording the grating gain factor. Variation of the initial gate transmission coefficient allows changing the peak power and energy in the pulse within several orders of magnitude.

It was shown in [29] that the use of a saturable YAG:Cr⁴⁺ absorber with a transmission coefficient of 5% in a YAG:Nd³⁺ laser with diode multi-kilowatt pumping and a loop resonator makes it possible to obtain pulses with a peak power of up to 30 MW. The variation of the initial transmission of the YAG:Cr⁴⁺ and GSGG:Cr⁴⁺ gates in the range of 5–55% makes it possible to change the peak power in the pulse from 250 kW to 30 MW with a change in the energy in the lasing train within 20% (Fig. 4). Such a significant range of peak radiation power makes it possible to implement the same effect at distances differing by several orders of magnitude without a significant change in the thermal regime of the laser operation.

Further increase of energy in the pulse can be achieved by increasing the pump energy or by adding,



5. **Anderson D. E. et al.** Characterization of LIBS emission lines for the identification of chlorides, carbonates, and sulfates in salt/basalt mixtures for the application to MSL ChemCam data. – *Journal of Geophysical Research Planets*, 2017, v.122(4). p.744–770.
6. **Cosentino A. et al.** Spaceborne lasers development for ALADIN instrument on board ADM-Aeolus ESA mission. – *Proc. SPIE*, 2015, v. 9626, p. 962662 1–9.
7. **Бачманов М. М. и др.** Тенденции развития радиолокационной аппаратуры и лидарных систем дистанционного зондирования Земли Российской Федерации. – *Космонавтика и ракетостроение*, 2014, т. 5, вып. 78, с.22–30.
8. **Любченко Ф. Н. и др.** Лазерные локаторы орбитального базирования. Принципы создания и возможности их использования. – *Космонавтика и ракетостроение*, 2014, т. 6, вып. 79, с. 5–12.
9. **Соколов А. Л. и др.** Космические ретрорефлекторные системы. – *Светотехника*, 2017, т. 4, с. 19–23.
10. **Калюта А. Н.** Глобальный мониторинг космической обстановки – важнейшее направление обеспечения военной безопасности Российской Федерации в воздушно-космической сфере. – *Военная мысль*, 2017, т. 9, с. 5–11.
11. **Ковтун В. С. и др.** Космические системы связи разработки Ракетно-космической корпорации "Энергия" имени С. П. Королева. – *Космическая техника и технологии*, 2015, т. 2, вып. 9, с. 3–24.
12. **Smutny V. et al.** 5.6 Gbps optical intersatellite communication link. – *Proc. SPIE*. 2009, v.7199, p.719906 1–8.
13. *Космонавтика XXI века. Попытка прогноза развития до 2101 года / под ред. Б. Е. Чертока.* – М.: РТСофт, 2010.
14. *Лазеры: применения и приложения / под ред. А. С. Борейшо.* – СПб.: Лань, 2016.

including coherent, radiation from several laser channels. In [30], the characteristics of the radiation of a YAG: Nd³⁺ laser based on a high power laser head have been studied. In a passive Q-switched mode with beam intersection in a saturable LiF: F₂ absorber with an initial transmission of 10%, a pulse train with an energy of 2.55 J and a radiation quality parameter $M^2 \leq 1.2$ were obtained with a divergence of 0.35 mrad and a spatial brightness of $7 \cdot 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$. Peak power of single-frequency pulses exceeded 21 MW at their energy of 230 mJ. An increase in the peak power of the radiation from the phase-conjugate laser can be achieved by active Q-switching.

Thus, phase-conjugate lasers are the tools with the possibility of varying energy and spectral characteristics in a wide range. This ensures the versatility of the laser installation for a wide range of applications and the ability to quickly change the generation parameters both within the same or different applications.

APPROACHES TO BUILDING THE LASERS FOR SPACE APPLICATIONS

Solid-state lasers, including fiber and semiconductor lasers, remain in the focus of attention of developers of spaceborne lidar and location technology due to

15. **Авдеев А. В. и др.** Анализ возможности очистки околоземного пространства от опасных фрагментов космического мусора с помощью космической лазерной установки на основе автономного непрерывного химического HF-лазера. – Квантовая электроника, 2011, т. 41, вып. 7, с. 669–674.
16. **Phipps C. R., Bonnal C.** A spaceborne, pulsed UV laser system for re-entering or nudging LEO debris, and re-orbiting GEO debris. – Acta Astronautica, 2016, v.118, p.224–236.
17. **Soulard R. et al.** ICAN: A novel laser architecture for space debris removal. – Acta Astronautica, 2014, v.105(1), p.192–200.
18. **Ивакин С. В.** Принципы построения лазерных комплексов дистанционного энергоснабжения низкоорбитальных космических аппаратов. – Интерэкспо Гео-Сибирь, 2015, т. 1, вып. 5, с.124–129.
19. **Naufeh T., Fast B. et al.** High Intensity Laser Power Beaming Architecture for Space and Terrestrial Missions. – NASA/TM-2011-217009, 2011, p.1–17.
20. **Kosmo K., Lubin P. et al.** Directed Energy Planetary Defense. – Proc. of IEEE Aerospace Conference, 2015, p.1–9.
21. **Lubin P.** The Roadmap to Interstellar Flight. – Journal of the British Interplanetary Society, 2016, v.69, p.40–72.
22. **Phipps C. R., Bonnal C. et al.** Small Payload Transfers from Earth to LEO and LEO to Interplanetary Space using Lasers. – Proc. of the 7th EUCASS, 2017, p.1–15.
23. **Bohn W. L.** Long range laser propagation: power scaling and beam quality issues. – Proc. SPIE. 2010, v.7751, p.775127 1–7.
24. **Борейшо А. С.** Мощные мобильные химические лазеры. – Квантовая электроника, 2005, т. 35, вып. 5, с. 393–406.
25. **Архипов Д. А. и др.** Оптимизация рабочих характеристик твердотельного лазера с диодной накачкой для космических применений. – Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2016, т. 16, вып. 8, с.1000–1007.
26. **Райкунов Г. Г. и др.** Перспективы, проблемы и пути создания лазерных космических электростанций. – Известия РАН. Энергетика, 2017, т. 2, с.165–176.
27. **Вениаминов С. С., Червонов А. М.** Космический мусор – угроза человечеству. Второе издание, исправленное и дополненное. – Механика, управление и информатика, 2011, т. 5, вып. 17, с.1–208.
28. **Pogoda A. P., Lebedev V. F. et al.** All-Solid-State Nd: YAG Lasers with Self-Pumped Multiwave-Mixing Phase Conjugate Cavities. – Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2013, v. 22(4), p.1–5.
29. **Погода А. П. и др.** Режим пассивной модуляции добротности твердотельного лазера с многопетлевым резонатором. – Письма в журнал технической физики, 2016, т. 42, вып. 6, с.35–41.
30. **Бурковский Г. В. и др.** Малогабаритный Nd: YAG-лазер с поперечной полупроводниковой накачкой и самонакачивающимся фазово-сопряженным многопетлевым резонатором. – Квантовая электроника, 2016, т. 46, вып.11, с.976–978.
31. **Zakharenkov Yu. et al.** 2-kW Average Power CW Phase-Conjugate Solid-State Laser. – IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, v.13(3), p. 473–479.
32. **McNaught S. et al.** 100-kW Coherently Combined Nd: YAG MOPA Laser Array. – Frontiers in Optics. OSA Technical Digest (CD), 2009, paper FThD2.
33. **Басиев Т. Т. и др.** Петлевые лазерные резонаторы на самонакачивающихся ОВФ-зеркалах в слабо усиливающих активных средах для сфазированных многоканальных лазерных систем. – Квантовая электроника, 2011, т. 41, вып. 3, с.207–211.
34. **Mason P. et al.** Kilowatt average power 100 J-level diode pumped solid state laser. – Optica, 2017, v.4, p.438–439.

acceptable energy efficiency, operational experience in space conditions, relative simplicity and ease of use.

The power of solid-state lasers is limited by the radiation stability of their active media, the limiting dimensions of which, in turn, are restricted by the technologies of growth (manufacture). The problem of amplified spontaneous emission, especially relevant in the case of wide-aperture disk active elements, is also limiting. The issues of ensuring thermal regimes are of critical importance.

High brightness of radiation in solid-state lasers is achieved using the "master oscillator + amplifier" architecture. An alternative to this solution can be implemented in a solid-state laser with the help of the phase conjugation effect with four-wave mixing. Solid-state phase-conjugate lasers provide the possibility of varying the radiation characteristics over a wide range while maintaining high brightness, which makes it possible to use them optimally in lidar and location space technology.

For solid-state lasers of large average power, including those capable of providing pulsed-periodic operation modes with extremely high pulse energies, required for ablation, long negative optical quality of radiation was considered the main drawback, which did not allow them to be considered for long-distance applications.

However, as has been shown recently [31–34], obtaining high brightness at a high average power of laser radiation becomes an achievable task if several physical phenomena are used: phase conjugation (to compensate for the wave front distortion in the amplifying stage) and the coherent addition of the emission of several channels (allowing to increase the total brightness of radiation in proportion to the square of the number of laser channels).

Modern approaches to the coherent addition consist in phasing and synchronizing the emission of individual laser channels by implementing the phase conjugation effect in stimulated Brillouin scattering or four-wave mixing in a laser active medium. The options of lasers for space applications are summarized in the table below.

CONCLUSION

High brightness solid-state phase-conjugate lasers remain an up-to-date research area, including in the interests of practical applications in space technology for solving lidar and location problems, energy transfer, ablation removal of space debris from the near-Earth orbits and ablation acceleration of space vehicles.