

УДК 621.373.826

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Nd:YAG-ЛАЗЕРА ИМПУЛЬСНОГО ДАЛЬНОМЕРА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В. Е. ОРЕХОВА¹⁾, В. Э. КИСЕЛЬ²⁾, К. А. ОРЕХОВ¹⁾

¹⁾Пеленг, ул. Макаенка, 25, 220114, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Исследованы пространственные характеристики импульсного лазера на основе цилиндрического кристалла иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами Nd^{3+} (Nd:YAG), с кондуктивно охлаждаемой боковой поверхностью для применения в составе систем измерения дальности авиационного базирования при энергии лазерных импульсов не менее 80 мДж на длине волны 1064 нм. Разработана конфигурация системы поперечной диодной накачки для цилиндрического кристалла Nd:YAG диаметром 4 мм с концентрацией ионов Nd^{3+} 0,9 ат. %, обеспечивающая эффективность накачки не менее 0,65. С использованием программного обеспечения *OpticStudio* и *LASCAD* рассчитаны профили поглощения излучения накачки для различных центральных длин волн излучения накачки и определена величина тепловой линзы в лазерном кристалле для частот следования импульсов 1,0; 4,0; 12,5; 22,0 Гц. Проведена оценка расходимости пучка лазерного излучения для плоского резонатора с переменной внутренней линзой. Экспериментально исследовано пространственное распределение лазерного излучения в дальней зоне для частот следования импульсов 1,0; 4,0; 12,5; 22,0 Гц в диапазоне температур окружающей среды от -40 до $+60$ °C при стабилизации температуры источника диодной накачки элементами Пельтье. Показано, что энергетическая расходимость лазерного излучения по уровню $\frac{1}{e^2}$ не превышает 1,9 мрад. При фиксированной температуре для

Образец цитирования:

Орехова ВЕ, Кисель ВЭ, Орехов КА. Пространственные характеристики Nd:YAG-лазера импульсного дальномера в широком диапазоне температур окружающей среды. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2024;1:26–41.
EDN: KGDKBX

For citation:

Orehova VE, Kisel VE, Orekhov KA. Spatial characteristics of a Nd:YAG laser for pulsed rangefinder over broad ambient temperature range. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2024;1:26–41. Russian.
EDN: KGDKBX

Авторы:

Виктория Евгеньевна Орехова – инженер-исследователь I категории научно-конструкторского управления «Космос».
Виктор Эдвардович Кисель – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий научно-исследовательским центром оптических материалов и технологий, профессор кафедры лазерной техники и технологии приборостроительного факультета.
Константин Александрович Орехов – ведущий инженер-исследователь научно-конструкторского управления «Космос».

Authors:

Viktoria E. Orehova, research engineer of the 1st category at the research and development department «Cosmos».
ve.orehova@gmail.com
Viktor E. Kisel, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the research centre for optical materials and technologies and professor at the department of laser technique and technology, faculty of instrumentation.
vekisel@bntu.by
Konstantin A. Orekhov, leading research engineer at the research and development department «Cosmos».
orehov@peleng.by

частот следования импульсов 1,0; 4,0; 12,5; 22,0 Гц и числа зарегистрированных импульсов не менее 45 двойное среднеквадратичное угловое отклонение энергетических центров масс профилей лазерного пучка в дальней зоне относительно усредненного положения энергетического центра масс для частоты следования импульсов 4,0 Гц не превышает 0,5 мрад. Полученные значения расходимости и двойных среднеквадратичных угловых отклонений энергетических центров масс профилей лазерного пучка в дальней зоне указывают на возможность применения лазера в составе дальномера на борту беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: лазерный дальномер; диодная накачка; расходимость лазерного пучка; Nd:YAG.

SPATIAL CHARACTERISTICS OF A Nd:YAG LASER FOR PULSED RANGEFINDER OVER BROAD AMBIENT TEMPERATURE RANGE

V. E. OREKHOVA^a, V. E. KISEL^b, K. A. OREKHOV^a

^a*Peleng, 25 Makajonka Street, Minsk 220114, Belarus*

^b*Belarusian National Technical University, 65 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220013, Belarus*

Corresponding author: V. E. Orekhova (ve.orehova@gmail.com)

Spatial characteristics of a pulsed laser based on neodymium-doped yttrium aluminium garnet (Nd:YAG) rod with conductively cooled barrel surface are investigated for use as part of airborne rangefinding systems for a pulse energy values not less than 80 mJ at a wavelength of 1064 nm. Diode side-pumping system configuration has been developed for a Nd:YAG rod with a diameter of 4 mm and Nd³⁺ ions concentration of 0.9 at. % with pump efficiency not less than 0.65. The pump light absorption profiles have been calculated for various central pump light wavelengths, and the value of thermal lens in laser rod has been determined for pulse repetition rates of 1.0; 4.0; 12.5; 22.0 Hz using the *OpticStudio* and *LASCAD* softwares. Laser beam divergence has been evaluated for a flat-flat resonator with variable internal lens. Spatial distribution of laser beam was experimentally studied in the far field over ambient temperatures range of –40 to +60 °C for pulse repetition rates of 1.0; 4.0; 12.5; 22.0 Hz while stabilising diode pumping source temperature by Peltier module. It is shown that divergence for a beam containing 86.5 % of total energy does not exceed 1.9 mrad. Double standard deviation of the far-field laser beam profile centroids relative to averaged centroid position for a pulse repetition rate of 4.0 Hz does not exceed 0.5 mrad at a fixed temperature for pulse repetition rates of 1.0; 4.0; 12.5; 22.0 Hz and recorded pulse number not less than 45. The obtained values of divergence and double standard deviation of the far-field laser beam profile centroids show the possibility to use the laser as part of rangefinder on board unmanned aerial vehicles.

Keywords: laser rangefinder; diode pumping; laser beam divergence; Nd:YAG.

Введение

Мощные твердотельные импульсные Nd:YAG-лазеры, функционирующие в режиме модуляции добротности, имеют широкое применение в оптических системах измерения дальности, аэрозольных лидарах и др. [1–9]. Для обеспечения наибольшей точности определения расстояния до предмета, расположенного под некоторым углом к направлению лазерного пучка, а также возможности измерения дальности на дистанциях от 10 км одними из наиболее существенных характеристик лазера в составе дальномера являются расходимость и стабильность пространственного положения лазерного пучка.

Типичные значения расходимости лазерного излучения в таких системах составляют 0,2–0,7 мрад [4, p. 31; 10, p. 878; 11; 12]. В целях уменьшения расходимости лазерного пучка на выходе излучения из резонатора располагают расширяющий телескоп. Для корректной работы дальномера авиационного базирования требуется обеспечить достаточную стабильность пространственных характеристик излучения в широком диапазоне температур окружающей среды для частот следования импульсов от единиц до десятков герц.

В настоящей работе исследованы характеристики твердотельного лазера для применения в составе дальномера на борту беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены результаты расчетов профиля поглощения излучения накачки для лазерного кристалла Nd:YAG с односторонней поперечной диодной накачкой. Проведена оценка расходимости лазерного пучка. Представлены результаты измерений расходимости и двойного среднеквадратичного углового отклонения энергетических центров масс профилей лазерного излучения в дальней зоне для прототипа лазера с термоэлектрической стабилизацией температуры диодного источника накачки и энергией импульса лазерного излучения не менее 80 мДж в диапазоне температур окружающей среды от –40 до +60 °C для частот следования импульсов 1,0; 4,0; 12,5; 22,0 Гц. Показано, что предложенная конфигурация обеспечивает возможность работы дальномера на расстоянии не менее 20 км.

Расчет отражателя квантрона

Лазер на основе цилиндрического кристалла Nd:YAG имеет плоский резонатор длиной 450 мм с трипель-призмой и зеркалами на одной подложке. Он способен генерировать короткие импульсы в режиме активной модуляции добротности, при этом источник накачки механически не связан с отражателем и лазерным кристаллом, а установлен на боковую стенку корпуса лазера [13]. При разработке отражателя квантрона учитывались следующие требования.

1. Конфигурация отражателя должна обеспечивать возможность использования в качестве источника накачки импульсных лазерных диодных матриц с центральной длиной волны лазерного излучения в пределах 800–810 нм, шириной спектральной линии на полувысоте 5 нм, общей мощностью в пике не менее 2200 Вт при эффективности накачки не менее 0,6.

2. Конфигурация системы накачки должна быть компактной и технологичной, ее производство не должно существенно повышать стоимость оптической системы.

3. Для обеспечения стабильности выходных характеристик лазера в широком диапазоне температур окружающей среды допускается применять термоэлектрический метод стабилизации температуры источника накачки с энергопотреблением не более 40 Вт.

Центральная длина волны лазерных диодных матриц при температуре +22 °С составляет 802 нм. Изменение длины волны излучения накачки в зависимости от температуры для применяемой модели лазерных диодных матриц составляет 0,3 нм/°С. Ширина излучающей площадки вдоль быстрой оси равна 3,4 мм. Расходимость излучения накачки вдоль быстрой оси на полувысоте составляет $40^\circ \pm 5^\circ$.

Для рассматриваемого твердотельного лазера с заданной конфигурацией резонатора целесообразно обеспечить наименьшие поперечные размеры лазерного кристалла, определяющие ограничивающую апертуру внутри резонатора. Это позволит снизить расходимость генерируемых лазерных импульсов путем подавления мод высших порядков в случае, когда радиус лазерного кристалла превышает радиус нулевой поперечной (TEM_{00}) моды, а также обеспечит компактные размеры квантрона. Минимальный поперечный размер лазерного кристалла определяется исходя из соблюдения требований к лучевой прочности покрытий оптических элементов внутри резонатора [14]. В исследуемом лазере применяются SiO_2 -покрытия, наносимые электронно-лучевым методом (*e-beam*), для них типичные значения лучевой прочности составляют около 10 Дж/см². Известно, что при работе в атмосфере на длине волны 1064 нм с длительностью импульса приблизительно 10 нс для покрытий данного типа характерно снижение лучевой прочности в 1,5–2,3 раза [15; 16] с ростом количества импульсов, приходящихся на фиксированную область покрытия, от 1 до 1000. Кроме того, предполагается, что поток лазерного излучения в сечении оптической оси резонатора имеет неравномерное распределение и в отдельных зонах может превышать усредненный поток до 2 раз. Исходя из указанных соображений, а также необходимости обеспечить двукратный запас лучевой прочности для внутрирезонаторной оптики, можно заключить, что плотность энергии лазерного излучения не должна превышать 0,9 Дж/см². С учетом выбранного коэффициента отражения выходного зеркала ($\rho = 0,25$) согласно работе [13] минимальный диаметр рабочей

зоны лазерного кристалла составит не менее 3,7 мм при наличии фаски или защитной диафрагмы с радиусом, на 0,2 мм меньшим радиуса торца. В целях обеспечения практичности производства (цилиндрические лазерные кристаллы с целочисленным диаметром, кратным 1 мм, широко представлены на мировом рынке) диаметр кристалла Nd:YAG был выбран равным 4 мм.

Боковая поверхность цилиндрического кристалла матированная. Угловой профиль рассеяния излучения, проходящего через боковую поверхность кристалла, аппроксимирован распределением Гаусса со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,45^\circ$. Концентрация ионов Nd^{3+} 0,9 ат. % выбрана в целях обеспечения высокого коэффициента поглощения излучения накачки, достаточного для достижения требуемой эффективности накачки.

Для компактности габаритов использована конфигурация с односторонней накачкой. Разработана форма отражателя, состоящая из одной цилиндрической диффузно отражающей поверхности и двух плоских зеркально отражающих поверхностей (рис. 1).

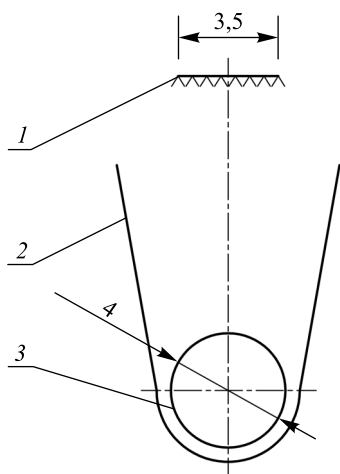


Рис. 1. Поперечное сечение системы накачки с отражателем:

1 – источник накачки (матрица лазерных диодов);
2 – отражатель; 3 – лазерный кристалл

Fig. 1. Pumping configuration cross section:

1 – pump source (laser diode array);
2 – reflector; 3 – laser crystal

Матрицы лазерных диодов расположены в ряд вдоль оси лазерного кристалла таким образом, что их быстрая ось перпендикулярна оси кристалла.

Наибольшая эффективность накачки наблюдается для длин волн излучения матриц лазерных диодов, соответствующих наибольшему значению эффективного коэффициента поглощения излучения накачки в лазерном кристалле $k_{\text{eff}}(\lambda_0)$ при центральной длине волны излучения накачки λ_0 , вычисляемого по формуле

$$k_{\text{eff}}(\lambda_0) = \frac{\ln\left(\int \alpha(\lambda - \lambda_0) e^{-k(\lambda)d_0} d\lambda\right)}{d_0},$$

где

$$\alpha(\lambda - \lambda_0) = \frac{1}{\sigma_{\text{LDA}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma_{\text{LDA}}} \right)^2},$$

$$\int \alpha(\lambda - \lambda_0) d\lambda = 1,$$

e – экспонента; $k(\lambda)$ – коэффициент поглощения излучения накачки для длины волны λ ; $d_0 = 5$ мм – расчетная длина пути внутри лазерного кристалла; $\sigma_{\text{LDA}} = 2,12$ нм – среднеквадратичное отклонение распределения Гаусса для линии с шириной спектра на полувысоте 5 нм.

С использованием программного обеспечения *OpticStudio* методом трассировки лучей проведено численное моделирование профиля поглощения в сечении, перпендикулярном оси лазерного кристалла, для различных длин волн излучения накачки (рис. 2).

Для эффективной накачки лазерного кристалла подходит источник накачки с длиной волны излучения 806–809 нм. Профили поглощения излучения накачки в сечении, перпендикулярном оси лазерного кристалла, имеют несимметричное относительно центра распределение (рис. 3).

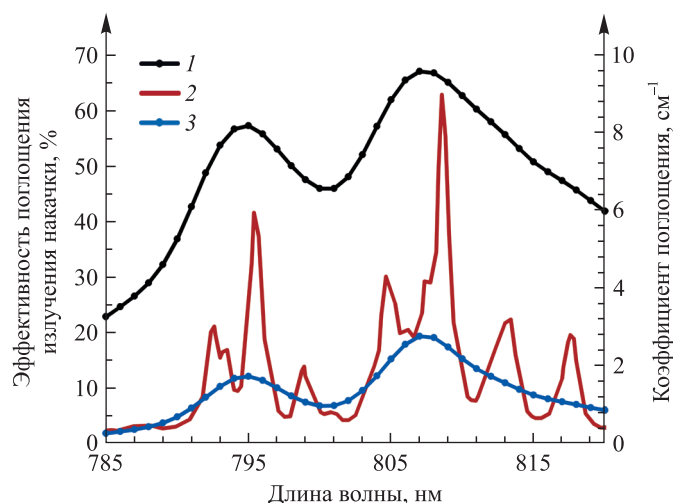


Рис. 2. Зависимость параметров системы накачки от длины волны:

- 1 – расчетная зависимость эффективности накачки цилиндрического кристалла Nd:YAG от центральной длины волны для диодного источника накачки с шириной спектра излучения на полувысоте 5 нм; 2 – зависимость коэффициента поглощения кристалла Nd:YAG с концентрацией ионов Nd^{3+} 1,0 ат. % от длины волны (взята из работы [17]); 3 – расчетная зависимость эффективного коэффициента поглощения кристалла Nd:YAG с концентрацией ионов Nd^{3+} 1,0 ат. % от центральной длины волны для диодного источника накачки с шириной спектра излучения на полувысоте 5 нм

Fig. 2. Dependence of pumping system parameters on wavelength:

- 1 – calculated dependence of Nd:YAG rod pump efficiency on central wavelength for diode pump source with emission spectrum full width at half maximum (FWHM) of 5 nm; 2 – dependence of Nd:YAG rod absorption coefficient on wavelength for Nd^{3+} ions concentration of 1.0 at. % (taken from work [17]); 3 – calculated dependence of Nd:YAG rod effective absorption coefficient on central wavelength for Nd^{3+} ions concentration of 1.0 at. % and diode pump source with emission spectrum FWHM of 5 nm

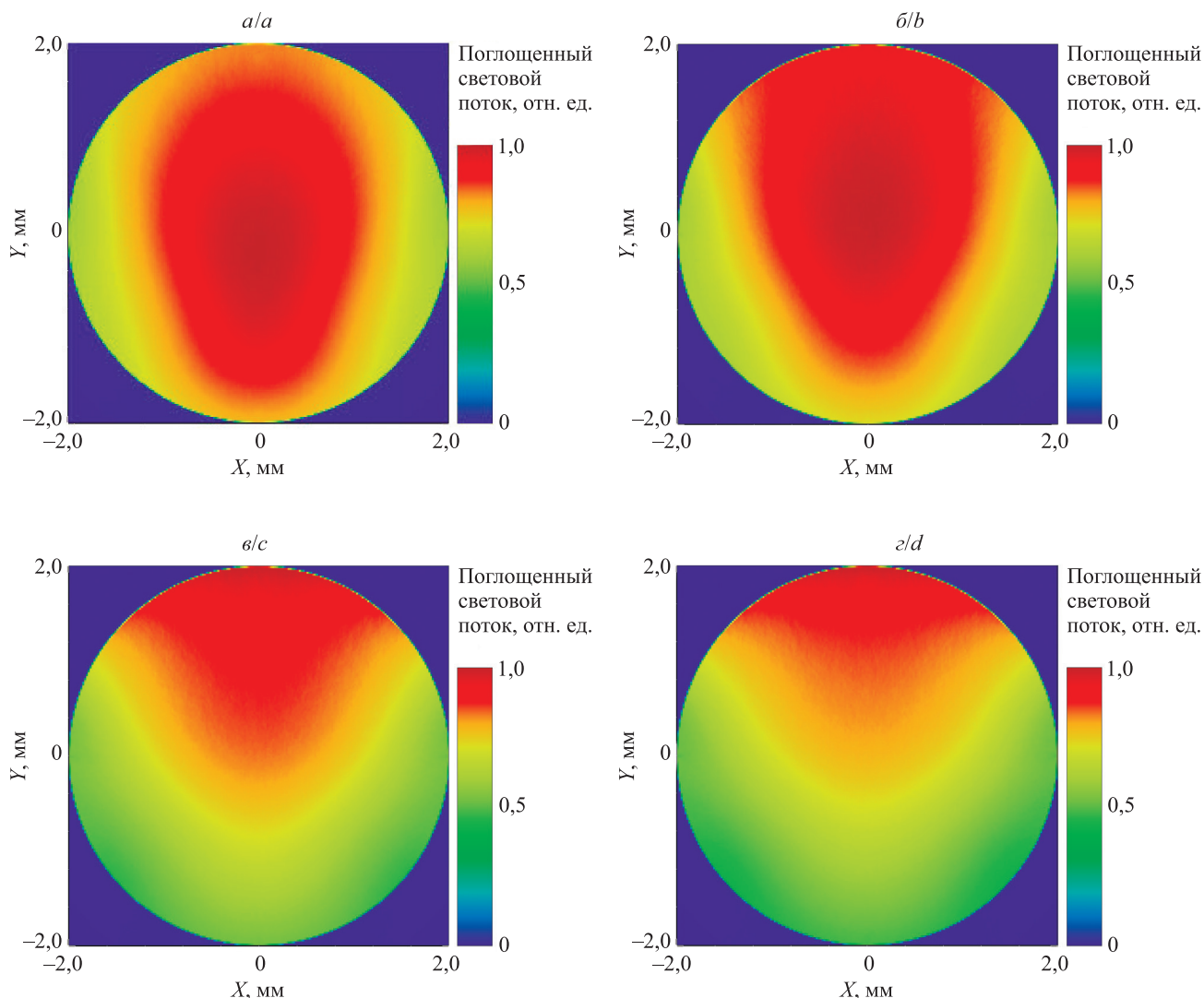


Рис. 3. Результаты численного моделирования в программном обеспечении *OpticStudio* профиля поглощения излучения накачки цилиндрического кристалла Nd:YAG диаметром 4 мм с концентрацией ионов Nd^{3+} 0,9 ат. % для диодного источника накачки с шириной спектра на полувысоте 5 нм и центральной длиной волны излучения 800 нм (а), 803 нм (б), 806 нм (в), 807 нм (г)

Fig. 3. The results of pump emission absorption profile numerical simulation using *OpticStudio* software for Nd:YAG rod diameter of 4 mm and Nd^{3+} ions concentration of 0.9 at. %, diode pump source with emission spectrum FWHM of 5 nm and central emission wavelength of 800 nm (a), 803 nm (b), 806 nm (c), 807 nm (d)

Наличие в профиле поглощения излучения накачки при длине волны, соответствующей наибольшему значению $k_{\text{eff}}(\lambda_0)$, области с повышенной плотностью поглощенной энергии может способствовать снижению инверсии населенностей в лазерном кристалле за счет усиленной спонтанной люминесценции, а также возникновению асимметричной термолинзы, приводящей к разьюстировке и ухудшению стабильности лазерного пучка в дальней зоне после включения лазера. Для минимизации указанного эффекта далее рассматривалась накачка при центральной длине волны 806 нм, соответствующей более равномерному профилю распределения энергии накачки в сравнении с таковым при накачке в пике поглощения с длиной волны 807–808 нм.

Расчет расходимости лазерного излучения

Для того чтобы в генерации лазерного излучения была задействована максимальная часть объема лазерного кристалла, использован плоский линейный резонатор, обеспечивающий постоянный поперечный размер нулевой моды вдоль всей длины лазерного кристалла в приближении малой оптической силы тепловой линзы [18, р. 586].

В табл. 1 приведены параметры кристалла Nd:YAG, использованные при расчетах.

Таблица 1

Свойства кристалла Nd:YAG

Table 1

Nd:YAG rod properties

Параметры	Значение
Теплопроводность, Вт/(м · К)	14
Температурный коэффициент показателя преломления	$9,1 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплового расширения, K^{-1}	$7,5 \cdot 10^{-6}$
Эластооптический коэффициент: радиальный тангенциальный	0,017 –0,0025
Показатель преломления	1,816
Длина волны излучения, нм	1064

Распределение поглощенной энергии в сечении лазерного кристалла оказывает влияние на модовый состав лазерного излучения, а также величину тепловой линзы в лазерном кристалле вдоль двух взаимно перпендикулярных осей. С использованием программного обеспечения *LASCAD* методом конечных элементов проведен расчет величины стационарной тепловой линзы для частот следования импульсов 1,0; 4,0; 12,5; 22,0 Гц (табл. 2) в приближении постоянного значения температуры боковой поверхности лазерного кристалла, через которую производится отвод тепла из внутреннего объема кристалла. Это значение принималось равным исходной температуре лазерного кристалла.

Таблица 2

**Расчетные фокусные расстояния
стационарной тепловой линзы в лазерном кристалле
для различных частот следования импульсов**

Table 2

**Calculated focal lengths of stationary thermal lens
in laser crystal for various pulse repetition rates**

Частота следования импульсов, Гц	Фокусное расстояние, м	
	Вдоль оси x	Вдоль оси y
1,0	240	250
4,0	60	62
12,5	19	20
22,0	11	11

Значения фокусных расстояний стационарной тепловой линзы для различных частот следования импульсов после начала работы лазера определяют модовый состав излучения. Расходимость нулевой моды лазерного резонатора на выходе определена методом матричной оптики [19, p. 171–175].

Матрица прохода через лазерный кристалл (M_{lc}) имеет вид

$$M_{lc} = M_{lc_n} M_{lc_f} M_{lc_n},$$

$$M_{lc_n} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{l_{lc}}{2n_{lc}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$M_{lc_f} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_{lc}} & 1 \end{pmatrix},$$

где M_{lc_n} – матрица прохода через половину длины лазерного кристалла; M_{lc_f} – матрица прохода через собирающую линзу с фокусным расстоянием, равным фокусному расстоянию тепловой линзы в лазерном

кристалле; l_{lc} – длина лазерного кристалла; n_{lc} – показатель преломления лазерного кристалла; f_{lc} – фокусное расстояние тепловой линзы в лазерном кристалле.

Матрица обхода через резонатор в обе стороны (M) определяется как

$$M = M_{l1} M_{lc} M_{l2} M_{l2} M_{lc} M_{l1},$$

$$M_{l1} = \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$M_{l2} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $l_1 = 20$ мм – расстояние от ближнего (по отношению к выходному зеркалу) торца лазерного кристалла до выходного зеркала; $l_2 = 330$ мм – длина оптического пути от дальнего (по отношению к выходному зеркалу) торца лазерного резонатора до глухого зеркала.

Согласно работе [20, р. 235] определены комплексный параметр (q) и радиус нулевой моды в перетяжке на выходном зеркале (ω_0):

$$q = \frac{M_{0,0} - M_{1,1}}{2M_{1,0}} + \sqrt{\frac{M_{0,1}}{M_{1,0}} + \left(\frac{M_{0,0} - M_{1,1}}{2M_{1,0}} \right)^2},$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{q\lambda}{i\pi}},$$

где $\lambda = 1064$ нм – длина волны лазерного излучения; i – мнимая единица.

Пространственное качество пучка (M^2) и расходимость излучения (θ) оценивались в зависимости от соотношения величин r и ω_0 согласно работам [20, р. 235; 21, с. 47]:

$$M^2 = \left(\frac{r}{\omega_0} \right)^2, \quad r > \omega_0,$$

$$M^2 = \frac{2,44}{1,27} = 1,9, \quad r < \omega_0,$$

$$\theta = \frac{2M^2\lambda}{\pi r},$$

где $r = 1,8$ мм – радиус ограничивающей апертуры защитной диафрагмы внутри лазерного резонатора. Расчетные значения радиуса нулевой моды, пространственного качества пучка и расходимости лазерного излучения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения радиуса нулевой моды в перетяжке на выходном зеркале, пространственного качества пучка и расходимости лазерного излучения для различных частот следования импульсов

Table 3

Calculated TEM₀₀ mode beam waist values at output mirror, spatial beam quality factor and laser beam divergence for various pulse repetition rates

Частота следования импульсов, Гц	Радиус нулевой моды, мм	Пространственное качество пучка	Расходимость лазерного излучения, мрад
1,0	1,80	1,92	0,721
4,0	1,30	1,91	0,719
12,5	0,98	3,35	1,260
22,0	0,86	4,43	1,670

Описание экспериментальной установки

Проведено экспериментальное исследование пространственного распределения излучения лазера в дальней зоне. Лазер был помещен в термокамеру с прозрачным окном для вывода лазерного пучка наружу. Лазерный пучок падает на плоскопараллельную пластину, выполняющую функцию светоделителя. За плоскопараллельной пластиной в ходе лазерного пучка установлен датчик энергии J-50MB-IR (*Coherent*, США) с измерителем Labmax-TOP (*Coherent*) для регистрации величины энергии генерируемых коротких лазерных импульсов. В ходе отраженного пучка расположены ослабляющие фильтры, собирающая линза с фокусным расстоянием $f_l = 758$ мм и инфракрасная камера SP928 (*Ophir*, США), размещенная таким образом, что ее фоточувствительная площадка находится в фокальной плоскости собирающей линзы (рис. 4).

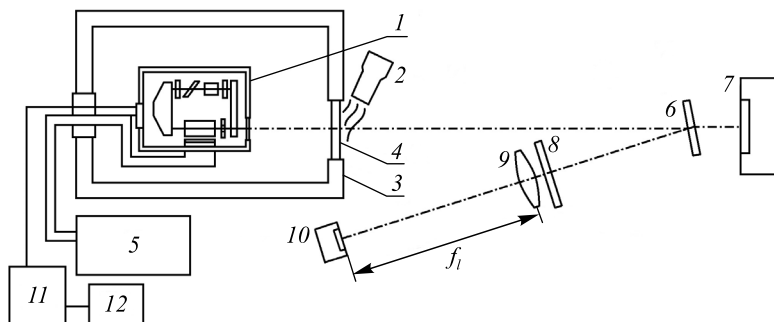


Рис. 4. Принципиальная схема стенда для проведения измерений энергии импульса и пространственного распределения интенсивности лазерного излучения в дальней зоне:
1 – лазерный резонатор в герметичном корпусе; 2 – промышленный фен; 3 – термокамера;
4 – окно; 5 – водяная система охлаждения теплооттока корпуса лазера; 6 – плоскопараллельная пластина;
7 – датчик энергии; 8 – оптический ослабляющий фильтр; 9 – собирающая линза; 10 – камера;
11 – блок электроники для управления работой лазера; 12 – компьютер

Fig. 4. Schematic diagram of the bench used for pulse energy and spatial far-field laser beam intensity distribution:

1 – laser in a sealed housing; 2 – industrial fan; 3 – thermal chamber; 4 – window;
5 – water cooling system for laser housing heat sink; 6 – optical flat; 7 – energy sensor;
8 – optical attenuating filter; 9 – collecting lens; 10 – camera;
11 – electronics unit to control the operation of laser; 12 – computer

Расходимость лазерного излучения измерялась методом фокального пятна. Рабочая температура теплооттока лазерных диодных матриц была равна $+35$ °С, что соответствует центральной длине волны излучения накачки 806 нм. Температура теплооттока лазерных диодных матриц регулировалась элементами Пельтье, имеющими мощность охлаждения до 30 Вт, с точностью до $\pm 0,5$ °С, отвод тепла от горячей стороны элемента Пельтье осуществлялся сбросом на радиатор с водяным охлаждением. Измерения проводились для температур внутри термокамеры -40 ; -10 ; $+5$; $+17$; $+25$; $+35$; $+45$; $+60$ °С и частот следования импульсов 1,0; 4,0; 12,5; 22,0 Гц с длительностью цикла импульсов 2 мин. Количество зарегистрированных импульсов в каждом цикле было не менее 45. При температурах окружающей среды -40 и -10 °С для предотвращения выпадения росы на окне термокамеры использовался промышленный фен. Во всем диапазоне температур окружающей среды и частот следования импульсов в течение цикла импульсов энергия лазерного импульса составляла не менее 80 мДж при энергии накачки не более 0,51 Дж [13].

Результаты и их обсуждение

Измерение расходимости лазерного излучения. Методом фокального пятна была измерена энергетическая расходимость лазерного излучения по уровню $\frac{1}{e^2}$ в течение цикла импульсов длительностью 2 мин. Энергия накачки составляла 0,49 Дж для температур окружающей среды от $+5$ до $+60$ °С и 0,51 Дж для температур окружающей среды -40 и -10 °С. Как видно из рис. 5, для частот следования импульсов 12,5 и 22,0 Гц значение расходимости растет на протяжении первых 20 с и далее не изменяется.

Расходимость лазерного излучения в наибольшей степени зависит от частоты следования импульсов (рис. 6) и в наименьшей степени – от температуры окружающей среды. Для различных частот следования импульсов и температур окружающей среды расходимость лазерного излучения в начале цикла равна $(1,0 \pm 0,1)$ мрад, а в конце цикла составляет от 1,0 до 1,8 мрад.

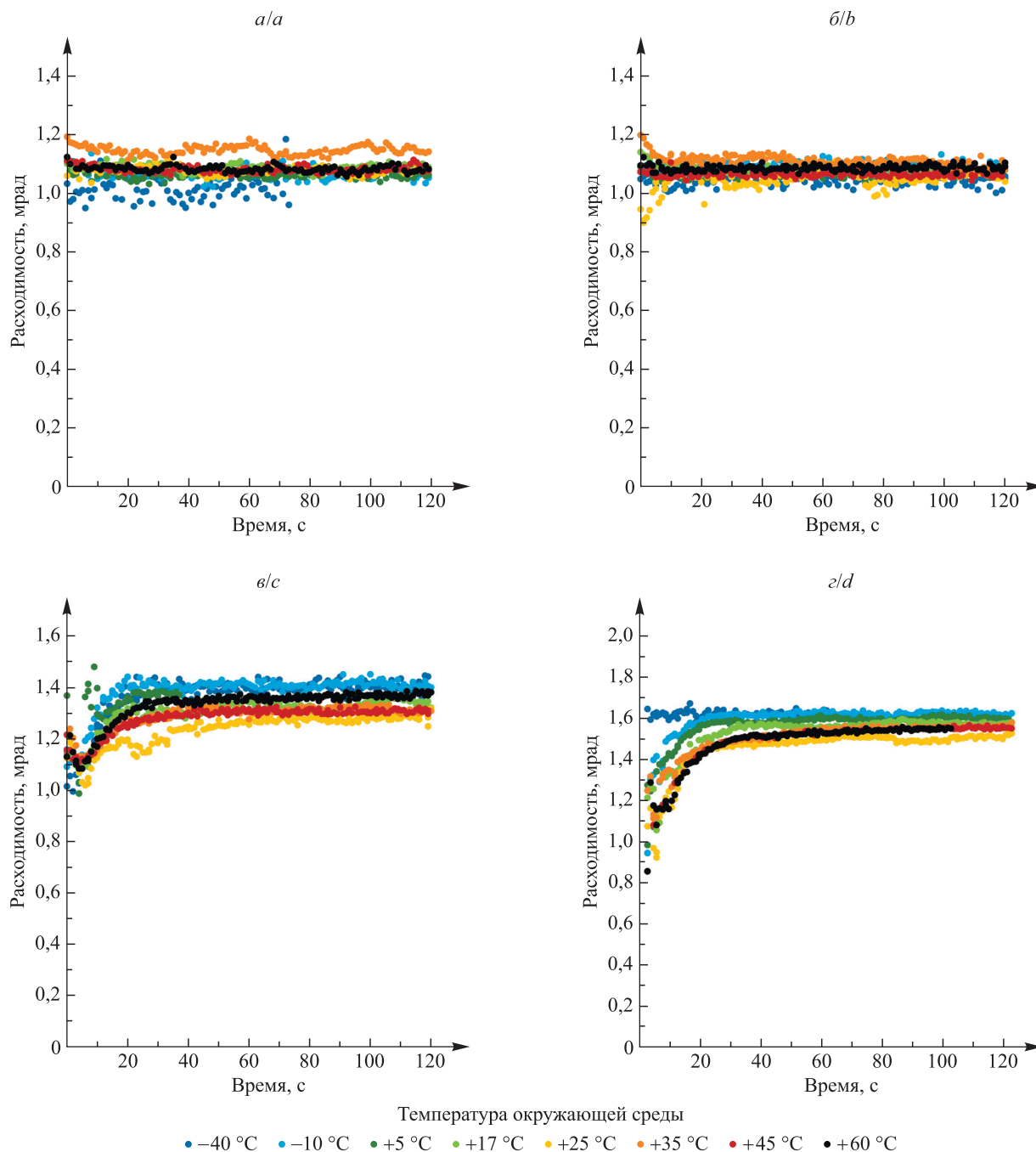


Рис. 5. Экспериментально полученные значения расходимости излучения для частот следования импульсов 1,0 Гц (а), 4,0 Гц (б), 12,5 Гц (в), 22,0 Гц (г)
Fig. 5. Experimentally obtained values of divergence for pulse repetition rates of 1.0 Hz (a), 4.0 Hz (b), 12.5 Hz (c), 22.0 Hz (d)

Измеренная величина расходимости растет в процессе формирования тепловой линзы в лазерном кристалле после начала работы лазера. Расходимость лазерного излучения в конце цикла повышается с ростом частоты следования импульсов из-за увеличения оптической силы тепловой линзы, вследствие чего происходит смещение резонатора из положения на границе устойчивости в более устойчивую область с возрастанием расходимости нулевой поперечной моды и количества поддерживаемых резонатором мод высоких порядков.

Расчетные и измеренные в диапазоне температур от -40 до $+60$ °C значения расходимости отличаются. Разница между ними составляет от 42 до 60 % (от расчетного значения расходимости) для частоты следования импульсов 1,0 Гц, от 46 до 54 % для частоты следования импульсов 4,0 Гц, от $-2,3$ до 9,5 % для частоты следования импульсов 12,5 Гц и от $-6,6$ до 3,5 % для частоты следования импульсов 22,0 Гц.

Измеренные значения расходимости лазерного излучения могут отличаться от расчетных значений из-за конечной точности метода фокального пятна, механической разъюстировки резонатора, наличия механических напряжений в лазерном кристалле вследствие отклонений формы изготовленных деталей квантрона от требуемой формы, а также из-за конечной точности расчета фокусного расстояния стационарной тепловой линзы, которое определялось в приближении постоянной температуры всей боковой поверхности лазерного кристалла без учета областей, не используемых для отвода тепла, и без учета ее нагрева в течение цикла.

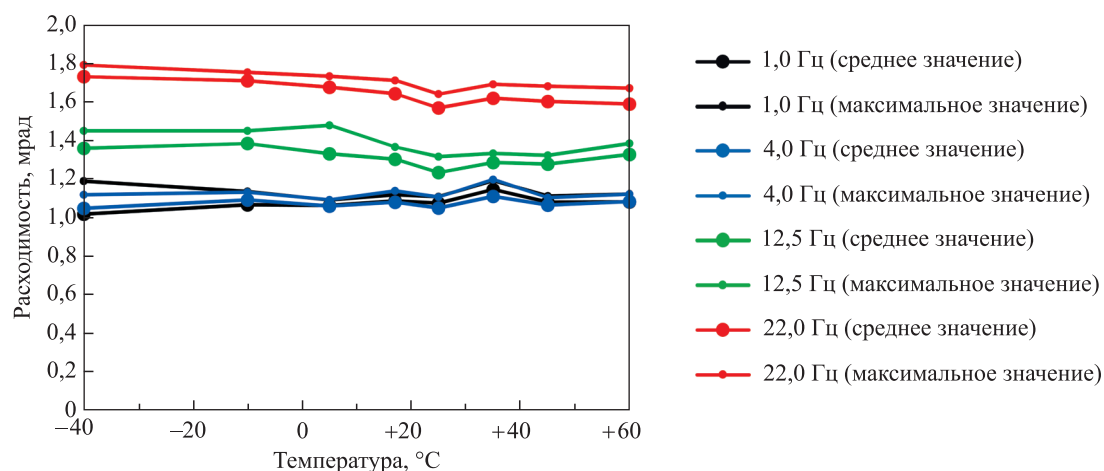


Рис. 6. Среднее и максимальное экспериментально полученные значения расходимости излучения для частот следования импульсов 1,0; 4,0; 12,5; 22,0 Гц

Fig. 6. Average and maximum experimentally obtained values of divergence for pulse repetition rates of 1.0; 4.0; 12.5; 22.0 Hz

Существует несколько причин, по которым измеренные значения расходимости для частот следования импульсов 1,0 и 4,0 Гц значительно превышают расчетные значения, а для частот следования импульсов 12,5 и 22,0 Гц согласуются с расчетными значениями с точностью не хуже 10 %. На расходимость при низких частотах следования импульсов оказывает влияние мгновенная тепловая линза, сформированная в кристалле сразу после поглощения излучения накачки перед началом генерации лазерного излучения. Неоптимальная юстировка лазерного резонатора в большей степени отражается на менее устойчивом резонаторе [22, р. 279], в данном случае на резонаторе с более низкой частотой следования импульсов. Для частоты следования импульсов 1,0 Гц расходимость лазерных импульсов оценивалась в приближении дифракционной расходимости излучения с плоским волновым фронтом, проходящим через круглое отверстие, без учета иного влияния. В оценке расходимости для частот следования импульсов от 4,0 Гц не учитывалось влияние дифракции на ограничивающей апертуре внутри резонатора. В случае когда поперечный размер световой зоны лазерного кристалла мало отличается от размера отверстия защитной диафрагмы, дифракционная составляющая расходимости для высоких частот следования импульсов будет значительно снижена за счет уменьшения поперечных размеров пучка [13] в результате действия собирающей тепловой линзы внутри лазерного кристалла.

Расходимость лазерного пучка в конце цикла при частотах следования импульсов 12,5 и 22,0 Гц может быть снижена за счет подбора оптимального внутреннего диаметра защитной диафрагмы (не менее 3,7 мм), при котором моды высших порядков при частотах следования импульсов 12,5 и 22,0 Гц будут значительно подавлены, но вместе с тем с учетом экранирования энергия лазерного импульса будет составлять не менее 80 мДж во всем диапазоне частот следования импульсов.

Измерение двойного среднеквадратичного углового отклонения лазерного пучка от усредненного положения. Определены энергетические центры масс профилей лазерного излучения для различных частот следования импульсов в дальней зоне (рис. 7).

Кроме того, определены максимальные и двойные среднеквадратичные угловые отклонения лазерного пучка от усредненного положения для частоты следования импульсов 4,0 Гц при различных частотах следования импульсов (рис. 8). Количество точек для каждого цикла составляло от 45 до 170. Максимальные угловые отклонения не превышают 0,4 мрад, а двойные среднеквадратичные угловые отклонения – 0,5 мрад. Наибольшие отклонения направления лазерного пучка наблюдаются для самой высокой частоты следования импульсов (22,0 Гц), а также для температуры окружающей среды –40 °C.

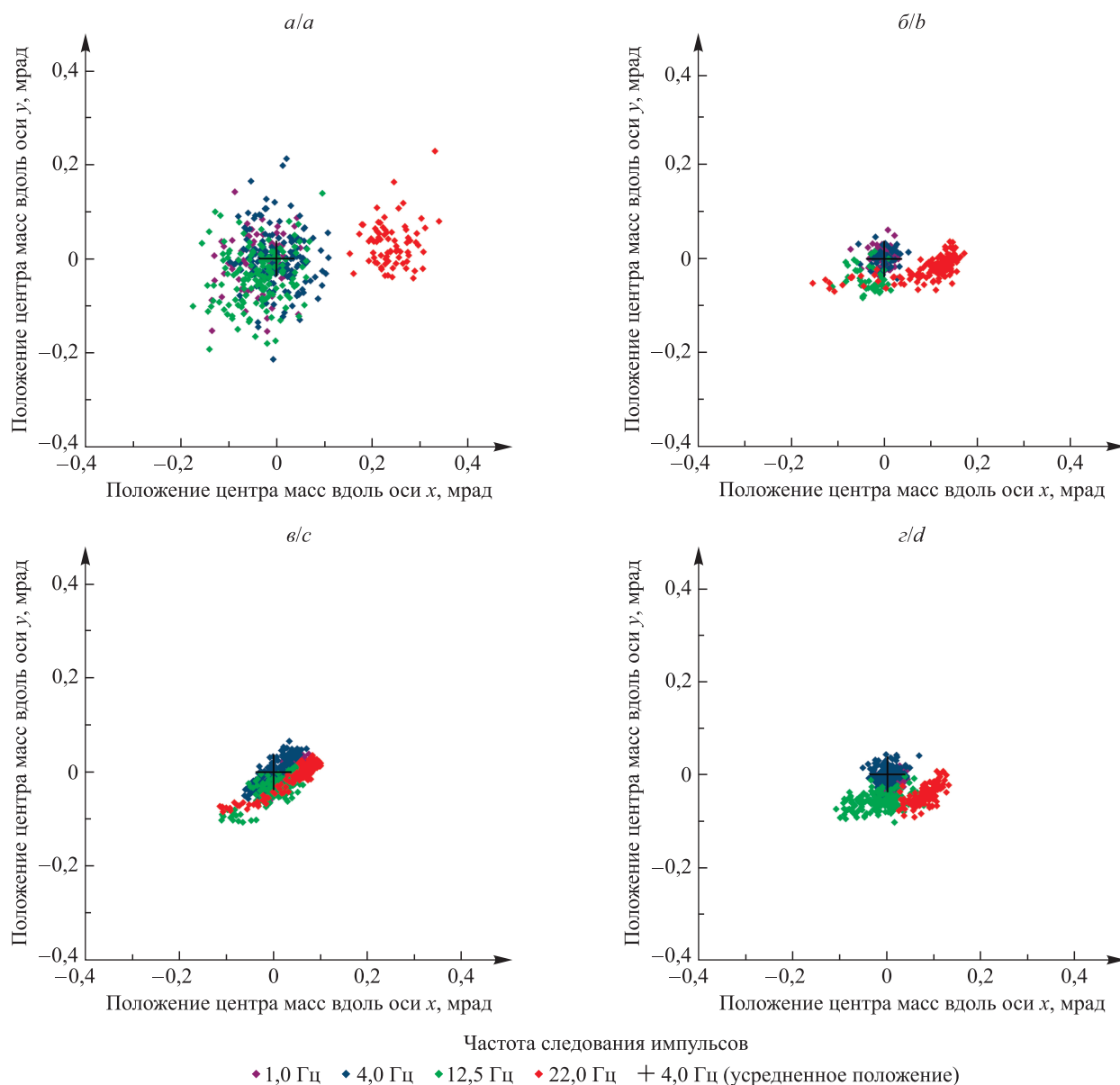


Рис. 7. Экспериментально полученное распределение поперечных угловых положений центров масс лазерного пучка с частотами следования импульсов 1,0; 4,0; 12,5; 22,0 Гц и их усредненное положение для частоты следования импульсов 4,0 Гц в течение цикла длительностью 2 мин при температуре окружающей среды -40°C (а), $+5^{\circ}\text{C}$ (б), $+35^{\circ}\text{C}$ (в), $+60^{\circ}\text{C}$ (г)

Fig. 7. Experimentally obtained angular position distribution of laser beam centroids during 2 min cycle for pulse repetition rates of 1.0; 4.0; 12.5; 22.0 Hz and its averaged position for a pulse repetition rate of 4.0 Hz at ambient temperature of -40°C (a), $+5^{\circ}\text{C}$ (b), $+35^{\circ}\text{C}$ (c), $+60^{\circ}\text{C}$ (d)

Изменение направления лазерных импульсов может происходить по ряду причин. Корпус лазера деформируется вследствие изменения температуры окружающей среды, а также в результате работы элемента Пельтье и нагрева лазерных диодных матриц, что может вызывать разъюстировку резонатора и смещение направления лазерного пучка. К разъюстировке также могут приводить деформации лазерного кристалла и деталей отражателя под воздействием излучения накачки.

Помимо деформаций, разъюстировку и смещение направления выходящего из резонатора излучения вызывает поперечный градиент температуры, возникающий в лазерном кристалле из-за неравномерности мгновенной тепловой линзы при односторонней накачке.

Неравномерный нагрев деталей отражателя вследствие частичного поглощения энергии накачки и однонаправленный поток тепла с отражателя на корпус также оказывают влияние на градиент температуры в лазерном кристалле. Сдвиг длины волны накачки в результате нагрева лазерных диодных матриц с последующим изменением профиля накачки и мгновенной тепловой линзы, а также рост оптической силы тепловой линзы и вызванное им изменение модового состава во время формирования стационарной тепловой линзы могут приводить к смещению направления выходящего излучения.

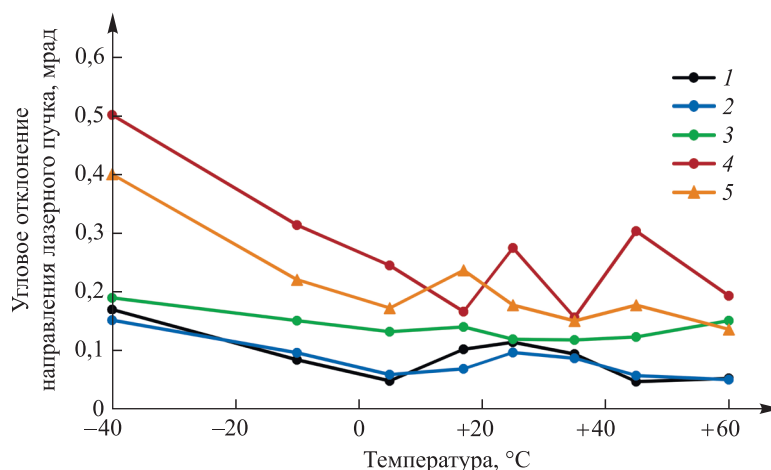


Рис. 8. Экспериментально полученная зависимость угловых отклонений направления лазерного пучка относительно усредненного положения центра масс для частоты следования импульсов 4,0 Гц от температуры:
1–4 – двойные среднеквадратичные угловые отклонения
для частот следования импульсов 1,0; 4,0; 12,5; 22,0 Гц соответственно;
5 – максимальное зарегистрированное значение отклонения

Fig. 8. Experimentally obtained dependence of the laser beam direction deviations relative to averaged centroid position for a pulse repetition rate of 4.0 Hz on temperature:
1–4 – double standard deviations for pulse repetition rates 1.0; 4.0; 12.5; 22.0 Hz respectively;
5 – maximum deviation value obtained

На увеличение значений углового отклонения лазерного пучка при температуре окружающей среды $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ оказывают влияние условия проведения измерений. Использование обдува окна термокамеры приводит к неоднородности температурного распределения воздуха в ходе распространения лазерного пучка, что, в свою очередь, вызывает рост величины двойных среднеквадратичных угловых отклонений энергетических центров масс лазерного пучка в дальней зоне.

Рассмотрен процесс изменения пространственного распределения интенсивности лазерного излучения в дальней зоне для частоты следования импульсов 22,0 Гц при температуре окружающей среды $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 9). Форма и положение энергетического центра масс лазерного пучка после начала работы лазера изменяются. В течение первых 5 с происходит незначительное смещение энергетического центра масс по горизонтали влево при небольшом увеличении размеров пучка. После 5-й и до 20-й секунды наблюдаются постепенный рост размеров пучка и смещение энергетического центра масс вправо. Модовый состав лазерного пучка формируется в течение 20 с. Спустя 20 с после начала работы лазера изменение положения и увеличение размеров пучка в дальней зоне останавливаются. Изображение пучка в дальней зоне через 20 с после начала работы лазера идентично изображению пучка через 120 с после начала работы лазера, так как конструкция лазера достигает состояния, аналогичного стационарному состоянию, при котором для каждого последующего импульса прекращается рост и устанавливается близкая к постоянной от импульса к импульсу временная зависимость распределения температуры в корпусе, отражателе и лазерном кристалле.

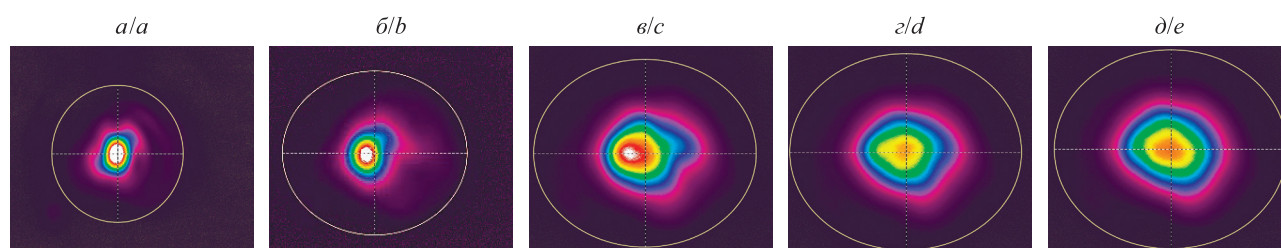


Рис. 9. Экспериментально полученное пространственное распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне для частоты следования импульсов 22,0 Гц при температуре окружающей среды $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$:
а – 1 с после начала работы лазера; б – 5 с после начала работы лазера; в – 12 с после начала работы лазера;
г – 20 с после начала работы лазера; д – 120 с после начала работы лазера

Fig. 9. Experimentally obtained spatial far-field intensity distribution of laser beam at ambient temperature of $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ for pulse repetition rate of 22.0 Hz:
а – 1 s after start; б – 5 s after start; в – 12 s after start;
г – 20 s after start; д – 120 s after start

Стабильность направления лазерного пучка для высоких частот следования импульсов может быть повышена путем использования более механически стабильной конструкции корпуса и тепловой изоляции от нее источника накачки, а также за счет выбора системы накачки, обеспечивающей более равномерный профиль поглощения.

Определение дальности измерений

Для дальномера при измерении расстояния до объекта, поверхность которого отражает свет по закону Ламберта [23], зависимость пиковой мощности, падающей на чувствительную площадку фотоприемного устройства (P_r), от мощности излучения лазера (P_{tr}) и дальности протяженного объекта (d) описывается формулой

$$P_r = P_{tr} \tau_{tr} \tau_{atm}^2 \rho \tau_r \cdot 2 \cos \beta \frac{S}{2\pi d^2} \frac{t_0}{t_b},$$

где $P_{tr} = \frac{E_{tr}}{t_0}$ – пиковая мощность излучения на выходе из лазера, E_{tr} – энергия импульса лазера, а t_0 – длительность импульса лазера; τ_{tr} – пропускание передающего канала системы дальномера; τ_{atm} – пропускание атмосферы; ρ – коэффициент отражения исследуемого удаленного объекта на длине волны 1064 нм; τ_r – коэффициент пропускания приемной части дальномера; β – угол падения лазерного излучения на поверхность исследуемого удаленного объекта; S – площадь апертуры объектива приемного канала дальномера; t_b – длительность уширенного импульса лазера в результате отражения под углом к поверхности. Величины t_b и τ_{atm} [24] определяются как

$$t_b = t_0 + 2 \frac{d \theta \operatorname{tg} \beta}{c},$$

$$\tau_{atm} = \exp \left(-3,912 \frac{d}{S_m} \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^q \right),$$

$$q = 0,585 (S_m)^{\frac{1}{3}},$$

где c – скорость света; S_m – метеорологическая дальность видимости, км; значения λ приводятся в микрометрах.

При отсутствии высокоинтенсивного шумового сигнала, вызываемого отражением солнечного света от поверхности Земли, дальность измерений лазера может быть определена как расстояние d , на котором мощность полезного сигнала P_r , падающего на фотоприемник дальномера, превышает пороговую мощность фотоприемного устройства P_{th} .

Проведен расчет мощности сигнала, падающего на чувствительную площадку, для объекта, расположенного под углом $\beta = 45^\circ$ на расстоянии $d = 20$ км. Используемые типовые значения параметров дальномера приведены в табл. 4.

Таблица 4

Внутренние параметры дальномера, использованные для расчета максимальной рабочей дальности

Table 4

Internal parameters used to calculate maximum operating distance for rangefinder

Параметры	Значение
E_{tr} , Дж	$80 \cdot 10^{-3}$
t_0 , с	$10 \cdot 10^{-9}$
τ_{tr}	0,97
ρ	0,3
τ_r	0,6
S , м ²	0,003
S_m , км	20
k	5
P_{th} , Вт	$10 \cdot 10^{-9}$

Для обеспечения низкой расходимости лазерного излучения (до $\theta = 0,3$ мрад) следует использовать расширяющий телескоп с кратностью не более $\times 0,167$ на выходе излучения из резонатора. Тогда световой диаметр выходного окуляра телескопа будет составлять от 24 мм. Размер лазерного излучателя с расширяющим телескопом может быть уменьшен до $60 \times 50 \times 200$ мм для применения в составе оптико-электронных систем на борту беспилотных летательных аппаратов.

Расчетная мощность излучения, падающая на чувствительную площадку, превышает пороговую мощность фотоприемного устройства в 3 раза, что позволяет зарегистрировать поступивший сигнал.

Заключение

Показана возможность функционирования лазера с односторонней диодной накачкой и термоэлектрической системой стабилизации температуры источника накачки в диапазоне температур окружающей среды от -40 до $+60$ °С при частотах следования импульсов 1,0; 4,0; 12,5; 22,0 Гц в течение 2 мин. При энергии импульса лазерного излучения не менее 80 мДж расходимость лазерного излучения составляет от 1,0 до 1,8 мрад, максимальное угловое отклонение направления лазерного пучка в дальней зоне не превышает 0,4 мрад. Пространственные характеристики излучения слабо зависят от температуры окружающей среды и устанавливаются постоянными спустя не более 20 с после включения лазера.

Показана возможность применения излучателя в составе дальномера для работы на расстоянии до 20 км при использовании на выходе излучения из резонатора расширяющего телескопа с кратностью не более $\times 0,167$.

Проведены расчет и экспериментальное измерение расходимости лазерного излучения для частот следования импульсов 12,5 и 22,0 Гц. Расчетные и измеренные значения совпадают в пределах погрешности измерений. В дальнейшем, помимо уменьшения габаритов лазера, для повышения стабильности пучка планируется добавление тепловой изоляции между корпусом и источником накачки, а также разработка более механически стабильной конструкции корпуса лазера и формы отражателя, обеспечивающей более равномерный профиль поглощения излучения накачки.

Библиографические ссылки

1. Coney AT, Beecher S, Damzen MJ, Elder I. High-energy Q-switched Nd:YAG oscillator and amplifier development for large-mode, low-alignment sensitivity applications. *Laser Physics Letters*. 2022;19(8):085001. DOI: 10.1088/1612-202X/ac73f9.
2. Sabatini R, Richardson MA, editors. *Airborne laser systems testing and analysis*. [S. l.]: Research and Technology Organisation, North Atlantic Treaty Organisation; 2010. Report No.: RTO-AG-300-V26. Chapter 2.1, General; p. 2-1 (RTO AGARDograph 300); (Flight test techniques series; volume 26).
3. Maini AK. *Handbook of defence electronics and optronics: fundamentals, technologies and systems*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2018. Chapter 10.3.5.1, Nd:YAG and Nd:Glass range finders; p. 874–875.
4. Sabatini R, Richardson MA, Gardi A, Ramasamy S. Airborne laser sensors and integrated systems. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015;79:15–53. DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.07.002.
5. Polyakov VM, Kovalev AV, Uskov AV. Optimisation of the optical scheme of a compact double-pass Nd:YAG amplifier for range finding. *Quantum Electronics*. 2018;48(1):13–18. DOI: 10.1070/QEL16539.
6. Bahuguna KC, Sharma P, Vasan NS, Gaba SP. Laser range sensors. *Defence Science Journal*. 2007;57(6):881–890. DOI: 10.14429/dsj.57.1827.
7. Semwal K, Bhatt SC. Diode-pumped Nd:YAG eye-safe laser. *Applied Innovative Research* [Internet]. 2020 [cited 2023 February 25];2(3):181–184. Available from: <https://nopr.niscares.in/bitstream/123456789/55990/1/AIR%202%283%29%20181-183.pdf>.
8. Ashraf MM, Siddique M. Simulation of diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser generating eye-safe signal in IOPO environment. *Optics and Photonics Journal*. 2012;2(3):167–172. DOI: 10.4236/opj.2012.23025.
9. Kaskow M, Gorajek L, Zendzian W, Jabczynski J. MW peak power KTP-OPO-based «eye-safe» transmitter. *Opto-Electronics Review*. 2018;26(2):188–193. DOI: 10.1016/j.opelre.2018.04.005.
10. Maini AK. *Handbook of defence electronics and optronics: fundamentals, technologies and systems*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2018. Chapter 10.3.7, Some representative LRF systems; p. 878–884.
11. Goldberg L, Nettleton J, Shilling B, Trussel W, Hays A. Compact laser sources for laser designation, ranging and active imaging. In: Wood GL, Dubinskii MA, editors. *Laser source technology for defence and security III. Proceedings of the defense and security symposium; 2007 April 9–10; Orlando, USA*. Bellingham: The International Society for Optical Engineering; 2007. Paper No. 65520G (Proceedings of SPIE; volume 6552). DOI: 10.1117/12.722143.
12. Nejad SM, Olyae S. Low-noise high-accuracy TOF laser range finder. *American Journal of Applied Sciences*. 2008;5(7):755–762. DOI: 10.3844/ajassp.2008.755.762.
13. Орехова ВЕ, Кисель ВЭ, Орехов КА. Импульсный лазер с диодной накачкой для дальномеров, работающих в широком диапазоне температур. *Приборы и методы измерений*. 2023;14(1):27–37. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37.
14. Degnan JJ. Theory of the optimally coupled Q-switched laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1989;25(2):214–220. DOI: 10.1109/3.16265.
15. Jensen L, Jupé M, Mädebach H, Ehlers H, Starke K, Ristau D, et al. Damage threshold investigations of high-power laser optics under atmospheric and vacuum conditions. In: Exarhos GJ, Guenther AH, Lewis KL, Ristau D, Soileau MJ, Stolz CJ, editors. *Laser-induced damage in optical materials – 2006. Proceedings of the 38th annual Boulder damage symposium; 2006 September 25–27; Boulder, USA*. Bellingham: The International Society for Optical Engineering; 2006. Paper No. 64030U (Proceedings of SPIE; volume 6403). DOI: 10.1117/12.696443.

16. Wernham D. Optical coatings in space. In: Lequime M, Macleod HA, Ristau D, editors. *Advances in optical thin films IV. Proceedings of SPIE optical systems design; 2011 September 5–7; Marseille, France*. Bellingham: The International Society for Optical Engineering; 2011. Paper No. 81680F (Proceedings of SPIE; volume 8168). DOI: 10.1117/12.902318.
17. Lu J, Prabhu M, Song J, Li C, Xu J, Ueda K, et al. Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics. *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2000;71(4):469–473. DOI: 10.1007/s003400000394.
18. Hodgson N, Weber H. *Laser resonators and beam propagation: fundamentals, advanced concepts and applications*. 2nd edition. New York: Springer; 2005. Chapter 17.1, Porro prism resonators; p. 585–591.
19. Svelto O. *Principles of lasers*. 5th edition. Hanna DC, translator and editor. New York: Springer; 2010. XXI, 620 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-1302-9.
20. Hodgson N, Weber H. *Laser resonators and beam propagation: fundamentals, advanced concepts and applications*. 2nd edition. New York: Springer; 2005. Chapter 5.2.3, The TEM₀₀ mode; p. 235–241.
21. Аваньев ЮА. *Оптические резонаторы и лазерные пучки*. Москва: Наука; 1990. 264 с.
22. Hodgson N, Weber H. *Laser resonators and beam propagation: fundamentals, advanced concepts and applications*. 2nd edition. New York: Springer; 2005. Chapter 5.4.2, Two aperture limited mirrors; p. 277–279.
23. Burns HN, Christodoulou CG, Boreman GD. System design of a pulsed laser rangefinder. *Optical Engineering*. 1991;30(3):323–329. DOI: 10.1117/12.55801.
24. Ставров АА, Поздняков МГ. Импульсные лазерные дальномеры для оптико-локационных систем. *Доклады БГУИР* [Интернет]. 2003 [процитировано 18 марта 2023 г.];1(2):59–65. Доступно по: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/30959>.

References

1. Coney AT, Beecher S, Damzen MJ, Elder I. High-energy Q-switched Nd:YAG oscillator and amplifier development for large-mode, low-alignment sensitivity applications. *Laser Physics Letters*. 2022;19(8):085001. DOI: 10.1088/1612-202X/ac73f9.
2. Sabatini R, Richardson MA, editors. *Airborne laser systems testing and analysis*. [S. l.]: Research and Technology Organisation, North Atlantic Treaty Organisation; 2010. Report No.: RTO-AG-300-V26. Chapter 2.1, General; p. 2-1 (RTO AGARDograph 300); (Flight test techniques series; volume 26).
3. Maini AK. *Handbook of defence electronics and optronics: fundamentals, technologies and systems*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2018. Chapter 10.3.5.1, Nd:YAG and Nd:Glass range finders; p. 874–875.
4. Sabatini R, Richardson MA, Gardi A, Ramasamy S. Airborne laser sensors and integrated systems. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015;79:15–53. DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.07.002.
5. Polyakov VM, Kovalev AV, Uskov AV. Optimisation of the optical scheme of a compact double-pass Nd:YAG amplifier for range finding. *Quantum Electronics*. 2018;48(1):13–18. DOI: 10.1070/QEL16539.
6. Bahuguna KC, Sharma P, Vasan NS, Gaba SP. Laser range sensors. *Defence Science Journal*. 2007;57(6):881–890. DOI: 10.14429/dsj.57.1827.
7. Semwal K, Bhatt SC. Diode-pumped Nd:YAG eye-safe laser. *Applied Innovative Research* [Internet]. 2020 [cited 2023 February 25];2(3):181–184. Available from: <https://nopr.niscares.in/bitstream/123456789/55990/1/AIR%202%283%29%20181-183.pdf>.
8. Ashraf MM, Siddique M. Simulation of diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser generating eye-safe signal in IOPO environment. *Optics and Photonics Journal*. 2012;2(3):167–172. DOI: 10.4236/opj.2012.23025.
9. Kaskow M, Gorajek L, Zendzian W, Jabczynski J. MW peak power KTP-OPO-based «eye-safe» transmitter. *Opto-Electronics Review*. 2018;26(2):188–193. DOI: 10.1016/j.opelre.2018.04.005.
10. Maini AK. *Handbook of defence electronics and optronics: fundamentals, technologies and systems*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2018. Chapter 10.3.7, Some representative LRF systems; p. 878–884.
11. Goldberg L, Nettleton J, Shilling B, Trussel W, Hays A. Compact laser sources for laser designation, ranging and active imaging. In: Wood GL, Dubinskii MA, editors. *Laser source technology for defence and security III. Proceedings of the defense and security symposium; 2007 April 9–10; Orlando, USA*. Bellingham: The International Society for Optical Engineering; 2007. Paper No. 65520G (Proceedings of SPIE; volume 6552). DOI: 10.1117/12.722143.
12. Nejad SM, Olyae S. Low-noise high-accuracy TOF laser range finder. *American Journal of Applied Sciences*. 2008;5(7):755–762. DOI: 10.3844/ajassp.2008.755.762.
13. Orekhova VE, Kisel VE, Orekhov KA. Diode-pumped laser for rangefinders operating over wide temperature range. *Devices and Methods of Measurements*. 2023;14(1):27–37. Russian. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37.
14. Degnan JJ. Theory of the optimally coupled Q-switched laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1989;25(2):214–220. DOI: 10.1109/3.16265.
15. Jensen L, Jupé M, Mädebach H, Ehlers H, Starke K, Ristau D, et al. Damage threshold investigations of high-power laser optics under atmospheric and vacuum conditions. In: Exarhos GJ, Guenther AH, Lewis KL, Ristau D, Soileau MJ, Stolz CJ, editors. *Laser-induced damage in optical materials – 2006. Proceedings of the 38th annual Boulder damage symposium; 2006 September 25–27; Boulder, USA*. Bellingham: The International Society for Optical Engineering; 2006. Paper No. 64030U (Proceedings of SPIE; volume 6403). DOI: 10.1117/12.696443.
16. Wernham D. Optical coatings in space. In: Lequime M, Macleod HA, Ristau D, editors. *Advances in optical thin films IV. Proceedings of SPIE optical systems design; 2011 September 5–7; Marseille, France*. Bellingham: The International Society for Optical Engineering; 2011. Paper No. 81680F (Proceedings of SPIE; volume 8168). DOI: 10.1117/12.902318.
17. Lu J, Prabhu M, Song J, Li C, Xu J, Ueda K, et al. Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics. *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2000;71(4):469–473. DOI: 10.1007/s003400000394.
18. Hodgson N, Weber H. *Laser resonators and beam propagation: fundamentals, advanced concepts and applications*. 2nd edition. New York: Springer; 2005. Chapter 17.1, Porro prism resonators; p. 585–591.
19. Svelto O. *Principles of lasers*. 5th edition. Hanna DC, translator and editor. New York: Springer; 2010. XXI, 620 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-1302-9.
20. Hodgson N, Weber H. *Laser resonators and beam propagation: fundamentals, advanced concepts and applications*. 2nd edition. New York: Springer; 2005. Chapter 5.2.3, The TEM₀₀ mode; p. 235–241.

21. Anan'ev YuA. *Opticheskie rezonatory i lazernye puchki* [Optical cavities and laser beams]. Moscow: Nauka; 1990. 264 p. Russian.
22. Hodgson N, Weber H. *Laser resonators and beam propagation: fundamentals, advanced concepts and applications*. 2nd edition. New York: Springer; 2005. Chapter 5.4.2, Two aperture limited mirrors; p. 277–279.
23. Burns HN, Christodoulou CG, Boreman GD. System design of a pulsed laser rangefinder. *Optical Engineering*. 1991;30(3): 323–329. DOI: 10.1117/12.55801.
24. Stavrov AA, Pozdniakov MG. Pulse laser rangefinders for optic location systems. *Doklady BGUIR* [Internet]. 2003 [cited 2023 March 18];1(2):59–65. Available from: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/30959>. Russian.

Получена 04.10.2023 / исправлена 24.10.2023 / принята 25.10.2023.
Received 04.10.2023 / revised 24.10.2023 / accepted 25.10.2023.