

Импульсный лазер с диодной накачкой для дальномеров, работающих в широком диапазоне температур

В.Е. Орехова¹, В.Э. Кисель², К.А. Орехов¹

¹ОАО «Пеленг»,

ул. Макаёнка, 25, г. Минск 220114, Беларусь

²НИЦ оптических материалов и технологий,

Белорусский национальный технический университет,

пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 06.02.2023

Принята к печати 10.03.2023

Представлен прототип импульсного лазера на кристалле иттрий-алюминиевого граната с ионами Nd^{3+} (Nd:YAG) с диодной накачкой, излучающего на длине волны 1064 нм, для применения в составе дальномеров авиационного базирования и атмосферных лидаров без применения дорогостоящих компонентов и технологий производства.

Проведён расчёт выходной энергии импульса лазерного излучения в режиме активной модуляции добротности. Получены пространственные характеристики лазерного излучения и зависимость энергии лазерного импульса от энергии импульса накачки при комнатной температуре. Приведены результаты измерений энергии лазерного импульса излучателя с диодной накачкой для частот следования 1; 4; 12,5; 22 Гц в течение 2 мин в температурном диапазоне от -40 до $+50$ °С. Стабилизация температуры матриц лазерных диодов обеспечивалась применением элемента Пельтье с максимально возможной мощностью охлаждения 30 Вт.

В исследованных диапазонах частот следования лазерных импульсов и температур окружающей среды были достигнуты значения энергии лазерного импульса не менее 80 мДж. Расходимость при комнатной температуре не превышает 1,9 мрад.

Ключевые слова: лазерный дальномер, Nd:YAG, активная модуляция добротности, диодная накачка.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37

Адрес для переписки:

Орехова В.Е.

ОАО «Пеленг»,

ул. Макаёнка, 25, г. Минск 220114, Беларусь

e-mail: vikawatutsina@gmail.com

Address for correspondence:

Orekhova V.E.

JSC «Peleng»,

Makayonka str., 25, g. Minsk 220114, Belarus

e-mail: vikawatutsina@gmail.com

Для цитирования:

В.Е. Орехова, В.Э. Кисель, К.А. Орехов.

Импульсный лазер с диодной накачкой для дальномеров, работающих в широком диапазоне температур.

Приборы и методы измерений.

2023. – Т. 14, № 1. – С. 27–37.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37

For citation:

V.E. Orekhova, V.E. Kisel, K.A. Orekhov.

[Diode-Pumped Laser for Rangefinders Operating over Wide Temperature Range].

Devices and Methods of Measurements.

2023, vol. 14, no. 1, pp. 27–37 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37

Diode-Pumped Laser for Rangefinders Operating over Wide Temperature Range

V.E. Orekhova¹, V.E. Kisel², K.A. Orekhov¹

¹JSC «Peleng»,
Makayonka str., 25, г. Minsk 220114, Belarus

²Center for Optical Materials and Technologies,
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 06.02.2023

Accepted for publication 10.03.2023

Abstract

A prototype of a pulsed diode-pumped laser based on Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet (Nd:YAG) crystal emitting at 1064 nm is presented for use in airborne rangefinders and atmospheric LIDARs without use of expensive production technologies and components.

Actively Q-Switched laser pulse energy was estimated. Spatial characteristics of laser beam and dependence of pulse energy on the pump pulse energy were obtained at room temperature. Results of diode-pumped laser pulse energy measurements are provided within 2 min for pulse repetition rates of 1, 4, 12.5, 22 Hz at ambient temperature range from -40 to +60 °C. Laser diode arrays temperature stabilization was achieved by the use of Peltier module with cooling capacity of 30 W.

Pulse energy values not less than 80 mJ were achieved in the studied ranges of ambient temperature and pulse repetition rate. Laser beam divergence at room temperature does not exceed 1.9 mrad.

Keywords: laser rangefinder, Nd:YAG, active Q-Switching, diode pumping.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37

Адрес для переписки:

Орехова В.Е.
ОАО «Пеленг»,
ул. Макаёнка, 25, г. Минск 220114, Беларусь
e-mail: vikawatutsina@gmail.com

Address for correspondence:

Orekhova V.E.
JSC «Peleng»,
Makayonka str., 25, г. Minsk 220114, Belarus
e-mail: vikawatutsina@gmail.com

Для цитирования:

В.Е. Орехова, В.Э. Кисель, К.А. Орехов.
Импульсный лазер с диодной накачкой для дальномеров,
работающих в широком диапазоне температур.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 1. – С. 27–37.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37

For citation:

V.E. Orekhova, V.E. Kisel, K.A. Orekhov.
[Diode-Pumped Laser for Rangefinders Operating
over Wide Temperature Range].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 1, pp. 27–37 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37

Введение

Импульсные твердотельные лазеры ближнего ИК-диапазона применяются в качестве передающей части в системах дистанционного зондирования и исследования атмосферы [1]. Мощные лазеры на основе кристалла Nd:YAG с диодной накачкой с энергией в импульсе более 50 мДж получили широкое использование в импульсных лазерных дальномерах для применения на борту вертолетов или беспилотных летательных аппаратов с дальностью измерений от 20 км [2–4], в активных оптических системах [5], а также в качестве передающей части и задающего генератора в системе генератор–усилитель в аэрозольных лидарах [6, 7]. Для указанных применений расходимость излучения после расширяющего телескопа обычно не превышает 0,3–0,5 мрад. Основными преимуществами таких дальномеров является их компактность и портативность, а также возможность применения в полевых условиях [3] с сохранением значений выходных параметров лазера.

В зависимости от типа и условий применения частота следования лазерных импульсов может составлять от 1 до 20–30 Гц [8, 9]. Разработка лазера в таком случае требует сохранения выходных параметров прибора в течение цикла из серии импульсов при различных частотах следования. Требуется также обеспечить устойчивость оптической системы лазера к воздействию вибраций и изменениям температуры окружающей среды.

В лазерах часто применяют активный элемент на основе кристалла Nd:YAG в форме параллелепипеда с параллельными входной и выходной гранями, расположенными относительно падающего луча под углом, близким или равном углу Брюстера [10–14] с поперечной односторонней накачкой для обеспечения высокой эффективности и диапазона частоты следования импульсов от нескольких герц до нескольких десятков герц. При этом следование правилам отбора кристалла Nd:YAG [15] и технология сборки квантрона могут приводить к значительному повышению себестоимости квантрона в сравнении с цилиндрическими активными элементами. Для обеспечения стабильной работы лазера часто применяется резонатор на основе двух призм

Порро с поляризационным выводом излучения [13, 16–18]. В таком случае предъявляются повышенные требования к технологии изготовления и лучевой прочности граней призм Порро.

В данной работе представлены результаты исследования оптической схемы резонатора импульсного лазера на основе линейной П-образной конфигурации с трипель-призмой и квантроном на основе цилиндрического кристалла Nd:YAG диаметром 4 мм с поперечной диодной накачкой. Выбранная оптическая схема направлена на реализацию компактного лазера, не требующего применения дорогостоящих и высокотехнологичных компонентов, а также с сопоставимыми известным аналогам значениями выходных параметров лазерного излучения в диапазоне частот 1–22 Гц и при работе в широком температурном диапазоне окружающей среды (от -40 до +60 °С).

Схема лазера

Схема лазерного резонатора приведена на рисунке 1. Резонатор помещён в герметичный корпус, излучение выводится через защитное стекло. Резонатор длиной 450 мм образован двумя плоскими глухим и выходным зеркалами, выполненными на одной подложке 1 и трипель-призмой 7. Работу в режиме активной модуляции добротности обеспечивает электрооптический затвор 2, состоящий из поляризатора 5, ячейки Погкельса 4 на основе кристаллов РКТР и четверть-волновой фазовой пластинки 3. Для компенсации набега фаз, возникающего в поляризованном излучении в резонаторе в результате прохождения через трипель-призму, в резонатор дополнительно установлена четвертьволновая пластина. Юстировка резонатора производится поворотами вокруг оптической оси пары равных по величине оптических клиньев.

Квантрон 9 состоит из механически развязанных узла матриц лазерных диодов и узла медного отражателя с активным элементом. Узел матриц накачки представляет тонкую медную пластину с закреплёнными на ней датчиком температуры и тремя матрицами лазерных диодов с максимальной оптической мощностью 800 Вт, установленную на боковую стенку корпуса лазера изнутри. С внешней

стороны к стенке корпуса напротив матриц установлен элемент Пельтье с максимальной мощностью охлаждения 30 Вт. Использование элемента Пельтье при работе лазера позволяет стабилизировать температуру теплостока лазерных диодных матриц и обеспечить стабильность спектрального состава излучения накачки.

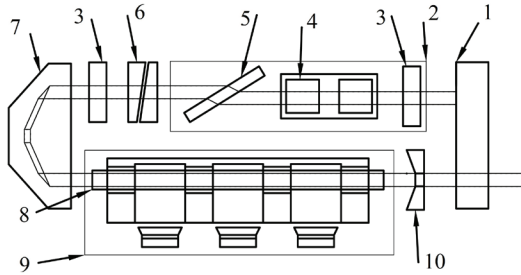


Рисунок 1 – Оптическая схема лазера: 1 – глухое и выходное зеркала на одной подложке; 2 – электрооптический затвор; 3 – четвертьволновая пластина; 4 – ячейка Погкельса; 5 – поляризатор; 6 – юстировочные клинья; 7 – трипель-призма; 8 – активный элемент; 9 – квантрон; 10 – защитная диафрагма активного элемента

Figure 1 – Laser optical scheme: 1 – rear and output mirrors on glass substrate; 2 – electro-optic Q-switch; 3 – quarter-wave plate; 4 – Pockels cell; 5 – polarizer; 6 – alignment Risley prism pair; 7 – corner cube prism; 8 – laser crystal; 9 – pump module; 10 – laser crystal optical aperture

Активный элемент квантрона на основе кристалла Nd:YAG с концентрацией ионов Nd^{3+} 0,9 ат.%, диаметром 4 мм и длиной 70 мм имеет полностью кондуктивное охлаждение через боковую поверхность. Контакт поверхности активного элемента и поверхностей деталей узла отражателя обеспечивается через слой кремнийорганического теплопроводящего материала. Детали узла отражателя выполнены таким образом, что отведение тепла с боковой поверхности кристалла происходит через 4 цилиндрические области длиной не менее 5 мм, расположенные между тремя областями боковой поверхности кристалла для накачки, напротив которых расположены матрицы накачки и отражатель, а также возле торцов кристалла.

Расчёт необходимой энергии накачки

В режиме активной модуляции добротности величина энергии накачки, необходимая для получения импульса определённой

энергии, зависит от величины коэффициента отражения выходного зеркала лазера ρ . При этом предпочтительны низкие значения ρ для снижения внутрирезонаторной интенсивности излучения на поверхностях оптических элементов и, соответственно, повышения надёжности прибора.

Для определения оптимальной величины ρ и минимальной мощности матриц накачки был проведён расчёт выходной энергии лазера для различных значений ρ (рисунок 2) и энергии накачки (рисунок 3). Расчёт проводился методом решения балансных уравнений согласно [19]. Изменение инверсии населённости и потока фотонов внутри резонатора для четырёхуровневой схемы кристалла Nd:YAG можно описать как:

$$\frac{d\Phi}{d\tau} = (\eta - 1)\Phi; \quad (1)$$

$$\eta(\tau) = \eta_0 - \int_0^{\tau} \gamma(\tau - \tau')\eta(\tau')\Phi(\tau')d\tau', \quad (2)$$

где $\Phi = \phi/\phi_0$, где ϕ – плотность фотонов в резонаторе, m^{-3} , $\phi_0 = 1/c\sigma_s t_c$, где c – скорость света, м/с, σ_s – поперечное сечение стимулированного испускания, m^2 , $t_c = t_r/(\ln(1/R)+L)$ – время жизни фотона в резонаторе, с, t_r – время полного обхода резонатора, с, L – относительные пассивные потери резонатора; $\tau = t/t_c$ – время в относительных величинах, где t – время, прошедшее с момента открытия затвора, с; $\eta = n/n_t$ – относительная плотность инверсии населённости, где n – плотность инверсии населённости, m^{-3} , $n_t = (\ln(1/\rho)+L)/2\sigma_s l$ – пороговая плотность инверсии населённости, где l – длина накачиваемой области активного элемента, м; $\eta_0 = n_i/n_t$, где n_i – начальная пороговая инверсия населённости в момент открытия затвора, m^{-3} ; $\gamma(\tau)$ определяются как:

$$\eta_i = W \cdot t_{up} \cdot (1 - e^{-t_{pump}/t_{up}}); \quad (3)$$

$$\gamma(\tau) = f_a + (1 - f_a)e^{-\Gamma\tau} + e^{-\frac{\Gamma}{30}\tau} (f_b + (1 - f_b)e^{-\Gamma\tau}), \quad (4)$$

где $W = P_{pump} \cdot k_{pump} \cdot n_{qeff} / h\nu_p \cdot A_c l$ – скорость накачки, $s^{-1} \cdot m^{-3}$, P_{pump} – мощность источника накачки, Вт, k_{pump} – эффективность поглощения мощности накачки, $n_{qeff} = 0.87$ – квантовая эффективность

накачки Nd:YAG [20], $h = 6,626 \cdot 10^{34}$ Дж·с – постоянная Планка, ν_p – частота излучения накачки, Гц, A_c – площадь торцов лазерного кристалла, м²; t_{up} – радиационное время жизни, с; t_{pump} – длительность импульса накачки, с; $f_a = 0,41$ – эффективность заселения верхнего лазерного уровня; $f_b = 0,19$ – эффективность заселения нижнего лазерного уровня; $\Gamma = \gamma_t \cdot t_c$, $\gamma_t = 1/t_t$, с⁻¹, где $t_t = 5 \cdot 10^{-9}$ с – время термализации нижних и верхних лазерных подуровней [19].

Численное решение уравнений (1), (2) определялось методом конечных разностей как:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{m+1} \\ \eta_{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - (\eta_m - 1) \frac{\delta\tau}{2} & -\Phi_m \frac{\delta\tau}{2} \\ \frac{\delta\tau \cdot \eta_m \cdot \gamma(0)}{2} & 1 + \frac{\delta\tau \cdot \Phi_m \cdot \gamma(0)}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_m \left(1 - \frac{\delta\tau}{2}\right) \\ \eta_0 - \delta\tau \sum_{k=0}^m \gamma(\delta\tau(m+1-k)) \eta_k \Phi_k \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где m – порядковый номер дискретно определяемой величины; $\delta\tau$ – шаг по времени в относительных величинах, с⁻¹. Выходная энергия лазерного излучения E определяется как:

$$E = \frac{h\nu \cdot A}{2\sigma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \delta\tau \sum_m \Phi_m, \quad (6)$$

где ν – частота лазерного излучения, Гц; $A = \pi d^2 g / 4$, м², где d – эффективный диаметр активной области торцов лазерного кристалла, м, g – относительный объём моды в активном элементе.

Параметры системы

System parameters

№	Параметр Parameter	Значение Value
1	Время жизни возбужденного состояния верхнего лазерного уровня Nd:YAG, с [19] Nd:YAG upper-state lifetime, s [19]	$230 \cdot 10^{-6}$
2	Поперечное сечение стимулированного излучения Nd:YAG, м ² [19] Nd:YAG stimulated emission crosssection, m ² [19]	$6.5 \cdot 10^{-23}$
3	Энергия фотона накачки, Дж Pump photon energy, J	$2.46 \cdot 10^{-19}$
4	Энергия фотона выходного излучения, Дж Laser photon energy, J	$1.87 \cdot 10^{-19}$

Из рисунка 2 видно, что для фиксированной величины энергии накачки 0,49 Дж расчётная величина энергии импульса растёт

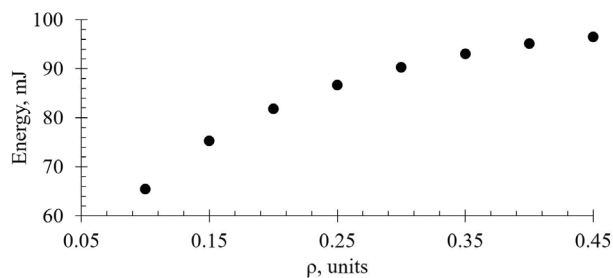


Рисунок 2 – Расчётные значения энергии лазерного импульса в режиме модуляции добротности в зависимости от коэффициента отражения выходного зеркала ρ . Величина энергии импульса накачки составляла 0,487 Дж

Figure 2 – Calculated laser pulse energy values in Q-switched mode depending on the reflectivity of the output mirror ρ . Pump pulse energy value amounts 0.487 J

Значения постоянных, использованных для расчёта, и параметры системы приведены в таблице 1.

При расчётах эффективный диаметр активной области торцов лазерного кристалла принят равным 3,6 мм ввиду ограничения защитной диафрагмой, относительные пассивные потери в резонаторе – 0,1, длительность накачки – 230 мкс, расчётная эффективность накачки принята равной 0,65, относительный объём моды в активном элементе – 0,7, длительность накачки выбрана равной 230 мкс.

Таблица 1 / Table 1

с увеличением коэффициента отражения зеркала до $\rho = 0,45$. Максимальная плотность энергии внутри резонатора J , Дж/см², равна [21]:

$$J = \frac{E_{out}}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \cdot \frac{1+\rho}{1-\rho}, \quad (7)$$

где E_{out} – выходная энергия излучения, Дж.

С учётом размеров рабочей области активного элемента, требуемой величины энергии импульса, величины лучевой прочности оптических компонентов, типичные значения которой не превышают 10 Дж/см^2 , а также с учётом неравномерности распределения интенсивности излучения в пучке, с целью снижения требований к лучевой прочности для оптических компонентов резонатора коэффициент отражения ρ принят равным $\rho = 0,25$.

Результаты исследования при комнатной температуре

На рисунке 3 приведена зависимость экспериментально полученной величины выходной энергии лазера в зависимости от величины энергии накачки при длительности импульса накачки 230 мкс для $\rho = 0,25$.

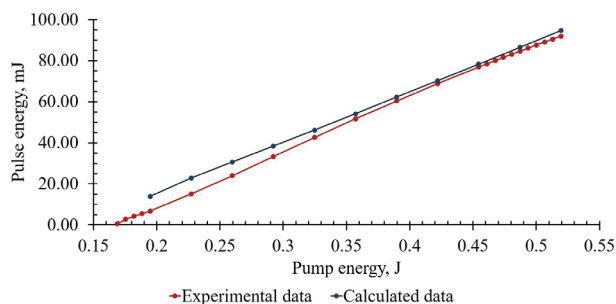


Рисунок 3 – Расчётная и измеренная зависимости энергии импульса в режиме модуляции добротности от энергии импульса накачки при $\rho = 0,25$. Экспериментальные данные получены при установленной температуре на датчике элемента Пельтье $35 \text{ }^\circ\text{C}$ при комнатной температуре, при частоте следования импульсов 4 Гц

Figure 3 – Calculated and measured dependencies of pulse energy in Q-Switched mode on pump pulse energy for $\rho = 0.25$. Experimental data were acquired at room temperature and with $35 \text{ }^\circ\text{C}$ set temperature of thermistor near Peltier module, for pulse repetition rate 4 Hz

Исследования проводились при стабилизации температуры теплостока матриц лазерных диодов при оптимальном значении $35 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, соответствующем центральной длине волны спектра излучения накачки 806 нм. Пороговая энергия накачки составляет 0,189 Дж.

Для энергии накачки 0,49 Дж величина энергии импульса выходного лазерного излучения составляет 84 мДж, оптический КПД $\eta = 17,4 \%$.

В таблице 2 приведены изображения излучения в ближней и дальней зоне в конце серии лазерных импульсов длительностью 2 мин. Различия профилей излучения в ближней зоне для различных частот следования отражают зависимость модового состава от величины установившейся термолинзы в лазерном кристалле, вызывающей смещение параметров резонатора в более устойчивую область, в результате чего увеличивается расходимость из-за увеличения количества поддерживаемых резонатором мод высоких порядков. В дальнейшем установка снаружи лазерного резонатора в ходе лазерного пучка телескопа с увеличением не более 0,16 позволит снизить расходимость лазерного излучения до 0,3 мрад.

Результаты исследования выходных параметров при температуре $-40 \dots +60 \text{ }^\circ\text{C}$

Проведены измерения энергии лазерного импульса при работе в термокамере при температуре окружающей среды $-40, -10, +5, +17, +25, +35, +45, +60 \text{ }^\circ\text{C}$. На рисунке 4 приведены усреднённые измеренные значения энергии лазерного импульса и её среднеквадратичные отклонения в течение цикла из серии импульсов при величине энергии накачки 0,487 мДж и при температуре окружающей среды от -10 до $+60 \text{ }^\circ\text{C}$. На рисунках 5a–5d приведены результаты измерения энергии лазерного импульса излучения в течение цикла из серии импульсов при величине энергии накачки 0,49 мДж для частот следования лазерных импульсов 1 Гц; 4 Гц; 12,5 Гц; 22 Гц соответственно.

На рисунках 5a–5d можно наблюдать периодические колебания энергии, вызванные колебаниями длины волны накачки из-за периодических изменений величины тепловой мощности, выделяемой элементами Пельтье. Колебания потребляемой мощности могут возникать и поддерживаться термоконтроллером из-за наличия некоторой временной задержки между появлением теплового потока с рабочей стороны элементов Пельтье и моментом регистрации его температурным датчиком узла матриц из-за высокого термического сопротивления конструкции корпуса и узла матриц.

Таблица 2/ Table 2

Пространственные характеристики пучка излучения моноимпульса при комнатной температуре при установленной температуре на датчике элемента Пельтье 35 °С

Spatial characteristics of laser beam at room temperature and with 35 °С set temperature of thermistor near Peltier module

Частота следования импульсов, Гц Pulse repetition rate, Hz	1	4	12.5	22
Профиль излучения в ближней зоне Near field spatial intensity distribution of the laser beam				
Профиль излучения в дальней зоне Far field spatial intensity distribution of the laser beam				
Расходимость, мрад Divergence, mrad	1.2	1.2	1.5	1.8

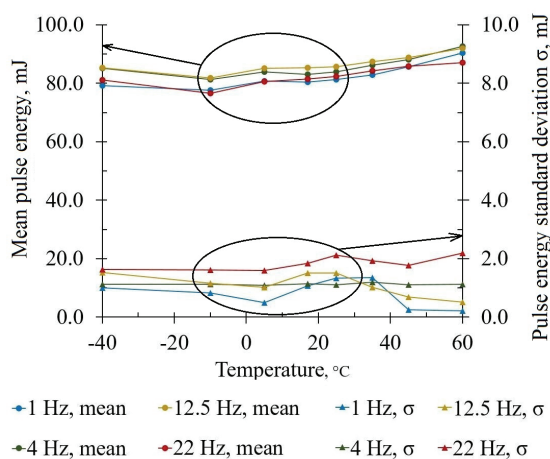


Рисунок 4 – Среднее значение энергии лазерного импульса излучения (ось слева) и среднеквадратическое отклонение энергии (ось справа) для частот следования лазерных импульсов 1; 4; 12,5; 22 Гц при различных температурах окружающей среды

Figure 4 – Mean pulse energy (left axis) and pulse energy standard deviation (right axis) for pulse repetition rates 1; 4; 12,5; 22 Hz at different ambient temperatures

Из рисунков 5a–5d видно, что энергия импульса лазера достигает 80 мДж менее чем через 2 с после начала работы лазера.

Из графиков изменений энергии на рисунках 5a–5c видно, что для частот следования лазерных импульсов 1; 4; 12,5 Гц наблюдается стабилизация среднего значения выходной энергии лазерного импульса в течение не более чем 10 с после момента включения. Аналогично из рисунка 5d для частоты 22 Гц в течение не более чем 6 с после момента включения рост энергии лазерного импульса сменяется постепенным снижением.

Описанная динамика изменений отражает процесс установления стационарной термолинзы в лазерном кристалле, при этом в первом случае распределение температуры в узле отражателя и активного элемента можно считать стационарным, а во втором случае для более высокой частоты следования лазерных импульсов избыток тепла отводится недостаточно

эффективно, из-за чего происходит разогрев активного элемента. Постепенное снижение энергии лазерного импульса излучения вызвано ростом температуры лазерного кристалла, что приводит к уменьшению поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания [22] Nd:YAG.

Пониженное значение энергии в течение первой секунды работы при частотах следования лазерных импульсов 12,5 Гц и 22 Гц вызваны особенностью работы электронных блоков лазера,

а именно частичным разрядом конденсаторов блока заряда, и могут быть устранены.

Для всех исследованных частот следования лазерных импульсов энергия лазерного импульса достигает 80 мДж менее чем через 2 с после начала работы лазера. Для частоты следования лазерных импульсов до 12,5 Гц спустя 10 с после включения тепловые процессы внутри лазера достигают стационарного состояния, устанавливаются постоянные значения выходных характеристик.

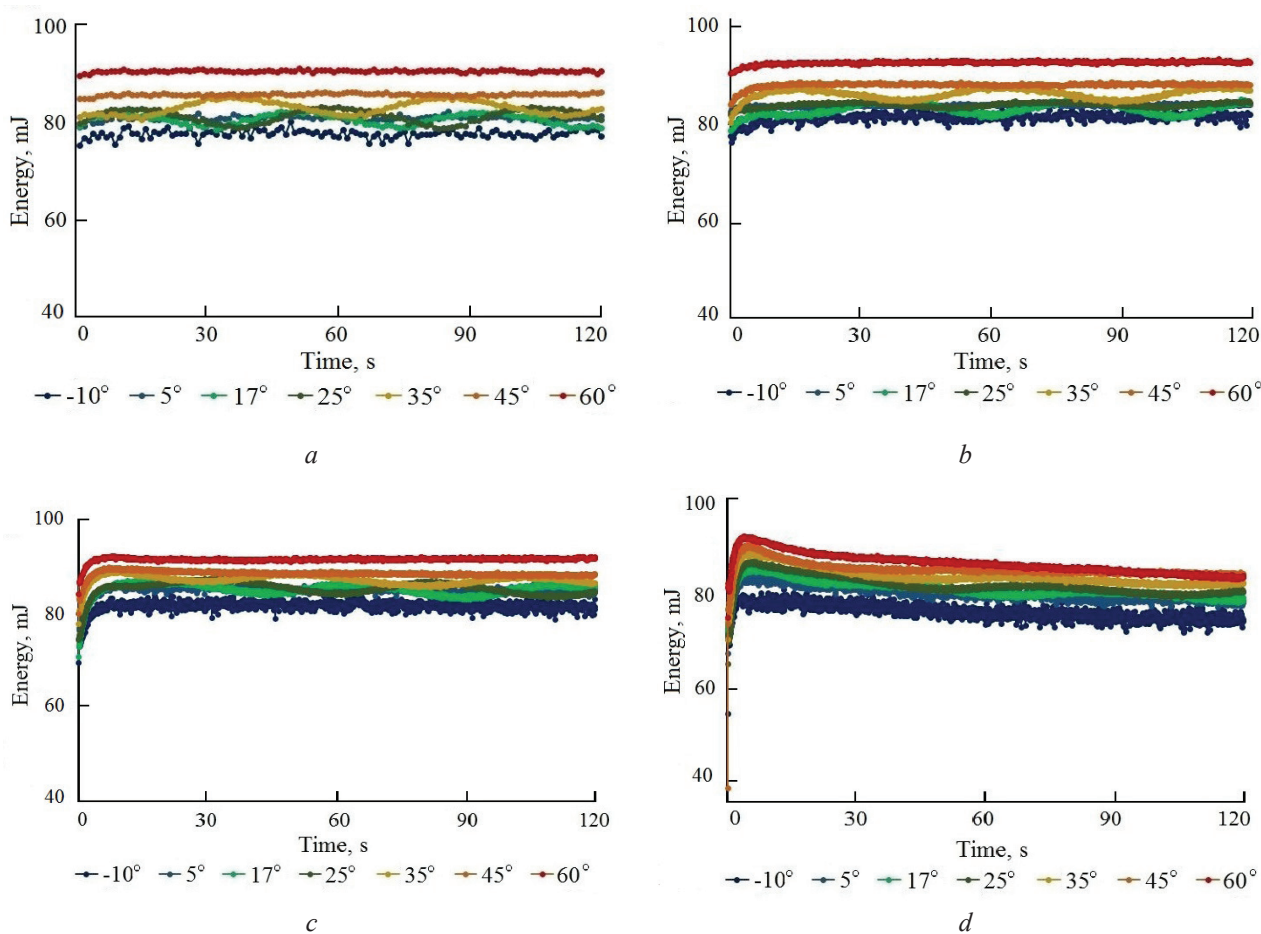


Рисунок 5 – График изменения выходной энергии лазерного импульса со временем при температурах окружающей среды -10, 5, 17, 25, 35, 45, 60 °C в течение 2 мин для частоты следования импульсов: *a* – 1 Гц; *b* – 4 Гц; *c* – 12,5 Гц; *d* – 22 Гц

Figure 5 – Graph of the change in the output energy of a laser pulse over time at ambient temperatures -10, 5, 17, 25, 35, 45, 60 °C within 2 min for pulse repetition rate: *a* – 1 Hz; *b* – 4 Hz; *c* – 12.5 Hz; *d* – 22 Hz

Из рисунков 5*a*–5*d* видно, что при температуре -10 °C выходная энергия составляет менее 80 мДж. Это вызвано сдвигом длины волны излучения накачки из-за снижения температуры излучающей площадки матриц лазерных диодов при сохранении температуры на датчиках возле теплостока. Снижение температуры

матриц лазерных диодов при пониженной температуре окружающей среды происходит из-за конечной величины теплового сопротивления стенки корпуса лазера и алюминиевой пластины для крепления матриц, расположенных между матрицами и температурным датчиком элемента Пельтье.

Таблица 3/ Table 3

Среднее значение энергии лазерного импульса излучения E_{mean} и среднее квадратическое отклонение энергии σ при температуре окружающей среды $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ для частот следования лазерных импульсов 1; 4; 12,5; 22 Гц

Mean pulse energy value E_{mean} and pulse energy standard deviation σ at ambient temperature $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ for pulse repetition rates 1, 4, 12.5, 22 Hz

Частота следования лазерных импульсов Pulse repetition rate	1	4	12.5	22
E_{mean} , мДж E_{mean} , mJ	80.8	85.1	85.3	81.5
σ , мДж σ , mJ	1.0	1.2	1.5	1.5

Были проведены измерения значений выходной энергии излучения при частоте следования лазерных импульсов 4 Гц при температуре окружающей среды $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ для исходной величины энергии накачки 0,49 Дж и при повышении её на 5 % до 0,51 Дж (рисунок 6). Также были проведены измерения выходной энергии лазерных импульсов при температуре окружающей среды $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 7, таблица 3).

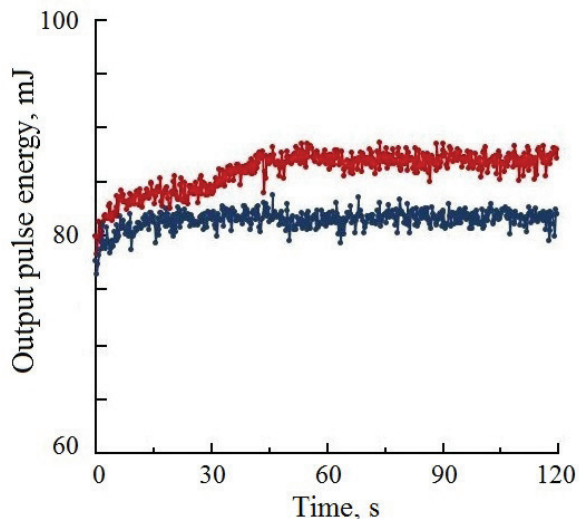


Рисунок 6 – Выходная энергия лазерного излучения для величины импульса накачки 0,51 Дж (красный) и 0,49 Дж (синий) для частоты следования лазерных импульсов 4 Гц при температуре окружающей среды $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 мин

Figure 6 – Laser pulse energy for pump pulse energy 0.51 mJ (red) and 0.49 (blue) for pulse repetition rate 4 Hz at ambient temperature $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

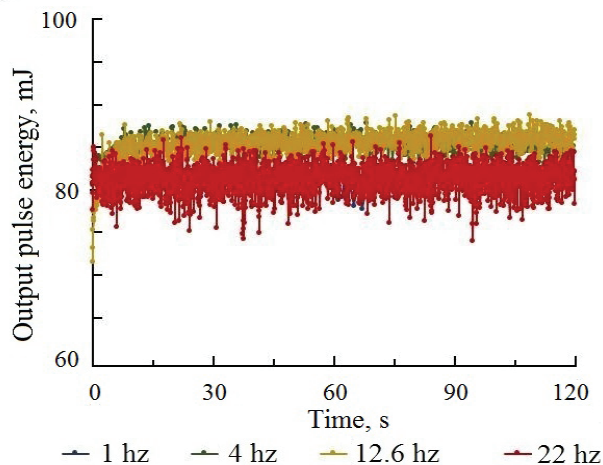


Рисунок 7 – Выходная энергия лазерного излучения для величины импульса накачки 0,51 Дж для частот следования лазерных импульсов 1 Гц; 4 Гц; 12,5 Гц; 22 Гц при температуре окружающей среды $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 мин

Figure 7 – Laser pulse energy for pump pulse energy 0.51 mJ for pulse repetition rates 1, 4, 12.5, 22 Hz at ambient temperature $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ within 2 min

Среднее значение энергии лазерного импульса при температуре окружающей среды $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ для энергии накачки 0,49 Дж и 0,51 Дж для частоты следования лазерных импульсов 4 Гц составляет соответственно 81,4 мДж и 85,9 мДж. Среднее значение энергии лазерного импульса при температуре окружающей среды $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ для энергии накачки 0,51 Дж для частот следования лазерных импульсов 1; 4; 12,5; 22 Гц составляет не менее 80 мДж.

Таким образом, значение выходной энергии лазера в условиях пониженной температуры может быть повышено за счёт увеличения энергии накачки.

Заключение

Проведён расчёт энергии импульса лазерного излучения, определена оптимальная величина коэффициента отражения выходного зеркала лазерного резонатора. Исследована величина энергии лазерного импульса при функционировании при комнатной температуре и в термокамере в широком диапазоне температур окружающей среды. Проведённые исследования позволили определить требования к источнику накачки и к характеристикам элемента Пельтье, а также кратность телескопа для рассматриваемого импульсного лазера.

Использованный подход позволил реализовать прототип лазера, способный функционировать в диапазоне частот следования лазерных импульсов 1–22 Гц в течение не менее 2 мин в диапазоне температур окружающей среды $-40\dots+60$ °С. Энергия лазерных импульсов составляет не менее 80 мДж при энергии импульса накачки не более 0,51 Дж.

В дальнейшем габариты исследуемой системы могут быть уменьшены за счёт сокращения длины резонатора, а также оптимизации конструкции.

Список использованных источников/ References

1. Sabatini R., Richardson M.A., Gardi A., Ramasamy S. Airborne laser sensors and integrated. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 79, Nov, 2015, pp. 15–53.

DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.07.002

2. Richardson M. Laser systems overview: General. Airborne Laser Systems Testing and Analysis. Dr. Mark A. Richardson. *Swindon*, 2010, Ch. 2.1, pp. 2–1.

3. Bahuguna K.C., Sharma P., Vasan N.S., Gaba S.P. Laser Range Sensors. *Defence Science Journal*, 2007, vol. 57, no. 3, pp. 881–890. DOI: /10.14429/dsj.57.1827

4. Долгих А.Е. Модель авиационного импульсного лазерного дальномера, работающего по аэродинамическим объектам / А.Е. Долгих, П.М. Жидков // Труды МАИ. Сер. Системный анализ, управление и обработка информации. – 2018. – № 100.

Dolgih A.E., Zhidkov P.M. *Model aviacionnogo impulsnogo lazernogo dalnomera, rabotayushhego po aéro-*

dinamicheskim obektam [Model of an aviation pulsed laser rangefinder operating on aerodynamic objects]. *Trudy MAI. Ser. Sistemnyj analiz, upravlenie i obrabotka informacii* [Proceedings of MAI. Ser. System analysis, management and information processing], 2018, no. 100 (in Russian).

5. Coney A.T., Beecher S., Damzen M.J., Elder I. High-energy Q-switched Nd:YAG oscillator and amplifier development for large-mode, low-alignment sensitivity applications. *Laser Physics Letters*, 2022, vol. 19, no. 8, p. 085001. DOI: 10.1088/1612-202X/ac73f9

6. Sicard M., Molero F., Guerrero-Rascado J.L., Pedrós R., Expósito F.J., Córdoba-Jabonero C., ..., Moreno J.M. Aerosol Lidar Intercomparison in the Framework of SPALINET – The Spanish Lidar Network: Methodology and Results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, vol. 47, no. 10, pp. 3547–3559.

DOI: 10.1109/TGRS.2009.2021525

7. Ryabtsev G.I., Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Kabanov V.V., Kostik O.E., Lebiadok Y.V., ..., Tsitavets U.S. Powerful all-solid-state multiwave laser for aerosol lidars. *Opticheskii Zhurnal*, 2014, vol. 81, pp. 20–25. DOI: 10.1364/JOT.81.000571

8. A.G.V. de Brum, F.C. da Cruz Reviewed plan of the ALR, the laser rangefinder for the ASTER deep space mission to the triple asteroid 2001-SN263. *Journal of Physics: Conference Series*, XVIII Brazilian Colloquium on Orbital Dynamics 28 November to 2 December 2016, vol. 911, 012016.

DOI: 10.1088/1742-6596/911/1/012016

9. Gerken M., Fritze J., Münzberg M., Weispfenning M. Military reconnaissance platform for the spectral range from the visible to the MWIR. *Infrared Technology and Applications XLIII: Proc. of SPIE*, 2019, vol. 10177, pp. 85–100. DOI: 10.1117/12.2264440

10. Ma X., Bi J., Hou X., Chen W. High efficiency diode-pumped slab oscillator and amplifier for space-based application. *J. Optics & Laser Technology*, 2011, vol. 43, no. 3, pp. 559–562.

DOI: 10.1016/j.optlastec.2010.07.016

11. Huang Y.J., Huang B.Y., Lin Y.C., Wang T.D., Tai P.T. Development of a high-energy Q-switched slab laser for targeting designation. *Proc. of SPIE, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XV*, 2018, vol. 10795, pp. 148–153.

DOI: 10.1117/12.2325287

12. Coyle D.B., Kay R.B., Stysley P.R., Poullos D. Efficient, reliable, long-lifetime, diode-pumped Nd:YAG laser for space-based vegetation topographical altimetry. *Applied Optics*, 2004, vol. 43, no. 27, pp. 5236–5242.

DOI: 10.1364/AO.43.005236

13. Coyle D.B., Kay R.B., Lindauer S.J. Design and performance of the vegetation canopy Lidar (VCL) laser

transmitter. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2002, vol. 3, p. 3. DOI: 10.1109/AERO.2002.1035282

14. Frese E.A. Component-level selection and qualification for the Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) laser altimeter transmitter. *Proc. of SPIE, Laser Radar Technology and Applications XXIII*, 2018, vol. 10636, pp. 184–193. DOI: 10.1117/12.2304032

15. White A.L. Wavelength Selection and Wide-Temperature-Range Operation of Neodymium-Doped Lasers: Thesis presented for the degree of Engineering Doctorate in Photonics. *Laser Cavity Design. Heriot-Watt University School of Engineering and Physical Sciences*, 2014, Ch. 1.1.4, p. 16.

16. Krebs D., Novo-Gradac A.-M., Li S., Lindauer S., Afzal R., Anthony W. Compact, passively Q-switched Nd:YAG laser for the MESSENGER mission to Mercury. *Applied Optics*, 2005, vol. 44, no. 9, pp. 1715–1718. DOI: 10.1364/ao.44.001715

17. Wei Xie Temperature insensitive high energy Q-switched Nd:YAG slab laser. *Laser Phys. Lett.*, 2017, vol. 14, no. 6, p. 5. DOI: 10.1088/1612-202X/aa6c7d8

18. McCarthy J.C., Young Y.E., Day R.C., Konves J., Ketteridge P.A., Snell K., Chicklis E.P. Athermal,

Lightweight, Diode-Pumped, 1 micron Transmitter. *Proc. of SPIE Solid State Lasers XIV, San Jose, Lasers and Applications in Science and Engineering*, 2005, vol. 5707, pp. 237–242.

DOI: 10.1117/12.589994

19. Degnan J.J., Coyle D.B., Kay R.B. Effects of thermalization on Q-switched laser properties. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, vol. 34, iss. 5, pp. 887–899. DOI: 10.1109/3.668777

20. Koechner W. Nd:YAG. Solid-State Laser Engineering. Dr. Walter Koechner, 6 ed., Round Hill Publ., 2006, ch. 4.1.2, pp. 54–61.

21. Lin Bo, Lee H.S., Prasad C.R. Temporal behavior of the laser pulse for intracavity optical parametric oscillator. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 8, pp. 4902–4908.

DOI: 10.1364/OE.15.004902

22. Yoon S.J., Mackenzie J.I. Implications of the temperature dependence of Nd:YAG spectroscopic values for low temperature laser operation at 946 nm. *Proc. of SPIE, Laser Sources and Applications II*, 2014, p. 8, vol. 9135, p. 913503.

DOI: 10.1117/12.2054333