

ХАРАКТЕРИСТИКИ Nd:YAG-ЛАЗЕРА С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ И Cr:YAG-ПАССИВНЫМ ЗАТВОРОМ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ

М. В. Богданович¹, А. В. Григорьев^{1*}, В. Н. Дудиков¹, А. Г. Рябцев¹,
Г. И. Рябцев¹, П. О. Татура¹, П. В. Шпак¹, Л. Л. Тепляшин¹, Г. С. Болтаев²

УДК 621.375.826+621.371

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-2-143-148>

¹ Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: ibebedo@gmail.com

² Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У. А. Арифова АН Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

(Поступила 15 февраля 2023)

Экспериментально исследована зависимость начального пропускания S_0 пассивного затвора на основе кристалла $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$ от температуры T . Показано, что при изменении T от -40 до $+60$ °C начальное пропускание увеличивается от 16.3 до 24.0 %. Результирующая кривая $S_0(T)$ аппроксимируется прямой линией с тангенсом угла наклона 0.076 %/град. При фиксированном уровне накачки энергия генерируемых импульсов E исследуемого Nd:YAG-лазера с ростом T в данном интервале падает со 100 до 90 мДж, а длительность импульсов τ возрастает от 9.3 до 12.0 нс. Результаты выполненных численных расчетов кривых $E(T)$ и $\tau(T)$ согласуются с экспериментальными зависимостями. Полученные данные позволяют более точно прогнозировать результаты температурных испытаний компактных неодимовых лазеров с диодной накачкой.

Ключевые слова: пассивный модулятор добротности, Cr:YAG-кристалл, температура, начальное пропускание, поперечная диодная накачка, Nd:YAG-лазер.

The dependence of the initial transmission S_0 of passive Q-switch based on $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$ crystal on temperature T has been experimentally investigated. It has been shown that the initial transmission is increased from 16.3 to 24.0 % with temperature changes from -40 to $+60$ °C. The resulting curve $S_0(T)$ is approximated by a straight line with a slope ratio of 0.076 %/degree. At a constant pumping level, the energy of the generated pulses E of the Nd:YAG laser decreases from 100 to 90 mJ, and the pulse duration τ increases from 9.3 to 12.0 ns with an increase in the T value in a given interval. The numerical calculations of the $E(T)$ and $\tau(T)$ curves agree with the experimental data. The results obtained make it possible to more accurately predict the results of the temperature tests of compact diode-pumped neodymium lasers.

Keywords: passive Q-switch, Cr:YAG crystal, temperature, initial transmission, transversal diode pump, Nd:YAG laser.

Введение. Высокая степень компактности мощных моноимпульсных твердотельных Nd:YAG-лазеров достигается не только использованием полупроводниковых систем накачки на основе линеек или матриц лазерных диодов, но и внедрением пассивных модуляторов добротности на основе кристаллов Cr:YAG [1—6]. В связи с расширением сферы практического применения Nd:YAG-лазеров на передний план выдвигаются все более высокие требования к обеспечению надежного функционирования лазерных излучателей. Например, диапазон рабочих температур T для многих специальных

CHARACTERISTICS OF TRANSVERSELY DIODE-PUMPED Nd:YAG LASER WITH Cr:YAG PASSIVE Q-SWITCH WITHIN WIDE TEMPERATURE RANGE

M. V. Bogdanovich¹, A. V. Grigor'ev^{1*}, V. N. Dudikov¹, A. G. Ryabtsev¹, G. I. Ryabtsev¹, P. O. Tatura¹, P. V. Shpak¹, L. L. Teplyashin¹, G. S. Boltayev² (¹B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: ibebedo@gmail.com; ²U. A. Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan)

излучателей задается на уровне от -40 до $+50\text{--}60$ °С. Несмотря на опубликованные исследования тепловых свойств Nd:YAG-лазеров с пассивными модуляторами добротности, данная проблема окончательно не решена. Во многом это связано с недостаточной изученностью тепловых характеристик кристаллов Cr:YAG, используемых в качестве пассивных просветляющихся фильтров (лазерных затворов) [1, 2, 7, 8]. В частности, данные о зависимости начального пропускания S_0 от температуры получены только для $T > 20$ °С [9]. Согласно [10], установление взаимосвязи между S_0 и T для Cr:YAG-затвора в широком интервале температур является одной из ключевых задач анализа тепловых свойств Nd:YAG-лазеров с пассивными модуляторами добротности.

Цель настоящей работы — установление связи тепловых параметров Cr⁴⁺:YAG-пассивного затвора с энергетическими и временными характеристиками Nd:YAG-лазера, возбуждаемого по схеме поперечной накачки матрицами лазерных диодов (МЛД). Особое внимание уделено зависимости начального пропускания S_0 кристалла Cr⁴⁺:YAG от температуры в интервале от -40 до $+60$ °С. На основании полученных экспериментальных данных о характере изменения $S_0(T)$ проведено численное моделирование энергетических и временных характеристик Nd:YAG-лазера.

Эксперимент. Оптическая блок-схема установки для измерений начального пропускания пассивного Cr⁴⁺:YAG-затвора в широком интервале температур представлена на рис. 1, а. Значения S_0 при T от -40 до $+60$ °С определялись по формуле $S_0 = (1/K)(I_2/I_1)$, где I_2 и I_1 — мощности пучков тестового лазера 1, прошедших через образец исследуемого затвора 8 и падающих на образец (после отражения от зеркал 4 и 3) [11]. Калибровочный коэффициент K задавался отношением I_{20}/I_{10} , где I_{20} и I_{10} — мощности пучков, регистрируемые измерителем мощности излучения 5 в случае отсутствия исследуемого образца в держателе 8. Тестовый лазер представлял собой маломощный непрерывный одномодовый Nd:YAG-излучатель, генерирующий на $\lambda = 1064$ нм. Мощность излучения ≤ 10 мВт. При диаметре пучка 0.426 см (гауссов профиль, измерение по уровню $1/e^2$) плотность мощности зондирующего излучения ~ 0.07 Вт/см², что более чем на пять порядков меньше плотности мощности насыщения для кристалла Cr⁴⁺:YAG [8, 12]. Мощности излучения I_2 , I_1 , I_{20} , I_{10} регистрировались измерителем Ophir Vega, позволяющим определять значения S_0 с относительной погрешностью ± 4 %. Для установления зависимости $S_0(T)$ держатель 8 с исследуемым образцом или без него, диафрагма 7

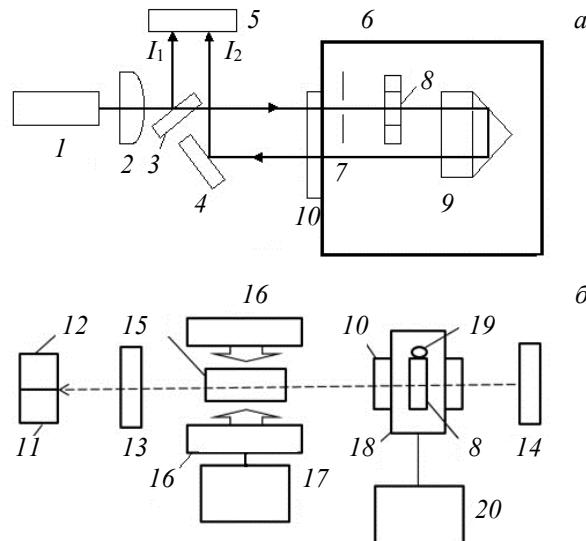


Рис. 1. Оптическая схема установки для измерения начального пропускания пассивного затвора (а) и оптическая схема диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности (б): 1 — маломощный тестовый Nd:YAG-лазер, 2 — коллиматор, 3 — поляризационный делитель пучка, 4 — отклоняющее зеркало, 5 — измеритель мощности излучения, 6 — климатическая камера, 7 — диафрагма, 8 — держатель с образцом исследуемого затвора или без затвора, 9 — обрачивающая призма, 10 — “теплые” окна, 11 — измеритель энергии, 12 — быстродействующий фотодиод, 13 — выходное зеркало резонатора, 14 — “глухое” зеркало лазерного резонатора, 15 — Nd:YAG-активный элемент, 16 — МЛД блока поперечной накачки лазера, 17 — блок питания МЛД, 18 — термостатический бокс, 19 — датчик температуры, 20 — система терmostабилизации бокса

и оборачивающая призма 9 помещались в климатическую камеру 6, позволяющую контролировать температуру с точностью до $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. На каждом этапе измерения $S_0(T)$ образцы $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$ выдерживались внутри климатической камеры в атмосфере сухого воздуха достаточно длительное время с целью устранения возможных температурных градиентов и осаждения влаги на поверхностях кристалла и оборачивающей призмы.

Образцы пассивных затворов изготовлены в виде дисков диаметром 6 мм из кристаллов $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$. Варьируя толщину диска, можно изменять начальное пропускание затвора в пределах от 15—20 до 70 %. При $S_0 = 20\%$ ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) толщина диска $L_{\text{Cr}} \approx 3.5\text{ mm}$. Обе рабочие поверхности каждого затвора просветлялись на $\lambda = 1064\text{ nm}$. Спектральные зависимости начального пропускания для образцов с различными значениями S_0 при комнатной температуре ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) показаны на рис. 2. Спектры оптического пропускания зарегистрированы с помощью двухлучевого спектрометра.

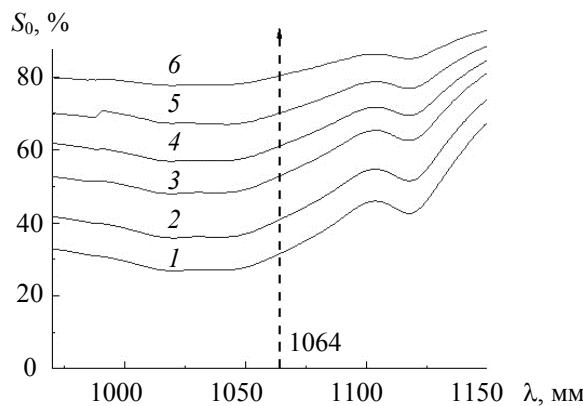


Рис. 2. Спектральная зависимость начального пропускания S_0 пассивных затворов $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$ при комнатной температуре окружающей среды; для $\lambda = 1064\text{ nm}$ $S_0 = 20$ (1), 30 (2), 42 (3), 50 (4), 60 (5) и 70 % (6)

Зависимость $S_0(T)$ для образца $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$ с начальным пропусканием 20 % при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлена на рис. 3. Для температур от -40 до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина S_0 возрастает от 16.3 до 24.0 %. Типичная кривая $S_0(T)$ аппроксимируется прямой линией с тангенсом угла наклона 0.076 %/град.

После измерений зависимости $S_0(T)$ кристаллы $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$ включали в состав Nd:YAG-лазера в качестве модуляторов добротности и исследовали энергетические и временные параметры генерируемого выходного пучка при различных температурах пассивных затворов с помощью установки, представленной на рис. 1, б. В лазерном резонаторе пассивный затвор размещался в терmostатической камере с “теплыми” просветленными окнами. Температура затвора внутри камеры контролируемым образом изменялась от -40 до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ с точностью не хуже $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

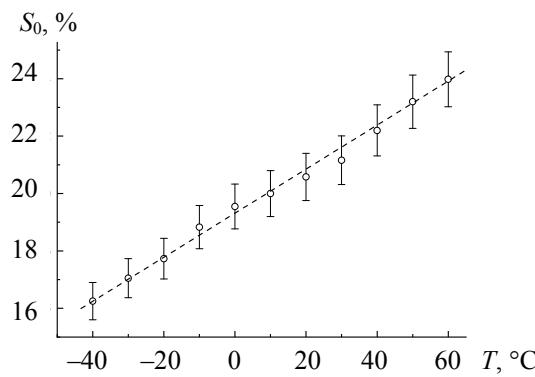


Рис. 3. Зависимость начального пропускания S_0 от температуры T пассивного затвора на основе кристалла $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$; $S_0 = 20\%$ при комнатной температуре ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$), точки — эксперимент, штриховая линия — аппроксимация

В качестве активного элемента (АЭ) лазера использован кристалл Nd:YAG диаметром $d_{\text{AЭ}} = 5$ мм и длиной $L_{\text{AЭ}} = 70$ мм с концентрацией ионов Nd³⁺ 1.1 ат.%. Торцы АЭ просветлялись на $\lambda = 1064$ нм. Боковые поверхности АЭ покрывались kleящим светорассеивающим слоем [13, 14]. АЭ со светорассеивающим слоем размещался внутри сапфировой трубы. Возбуждение АЭ проводилось тремя мощными МЛД (НПП “Инжект”, Россия) с использованием поперечной конфигурации блока накачки АЭ. Длина резонатора Nd:YAG-лазера $L_{\text{cav}} = 240$ мм. Для минимизации влияния тепловой линзы длительность импульсов возбуждения составляла 230 мкс, частота следования импульсов ≤ 10 Гц. Диаметр выходного пучка 0.43 см. Коэффициент отражения выходного зеркала резонатора $R = 40$ %. Регистрация энергии излучения в диапазоне $E \approx 90$ —100 мДж и длительности $\tau = 9$ —12 нс генерируемых импульсов осуществлялась с помощью измерителя энергии 11 и быстродействующего фотодиода 12.

При фиксированном уровне накачки энергия генерируемых импульсов исследуемого Nd:YAG-лазера с ростом температуры от -40 до $+60$ °C снижалась от 100 до 90 мДж. Как и в случае $S_0(T)$, кривая $E(T)$ допускает аппроксимацию прямой линией. Длительность импульса генерации τ возрастает от 9.3 до 12.0 нс, когда температура пассивного затвора увеличивается от -40 до $+60$ °C. Зависимость $\tau(T)$ характеризуется небольшим изломом в области T от -10 до 0 °C (область обозначена стрелкой A на рис. 4, б).

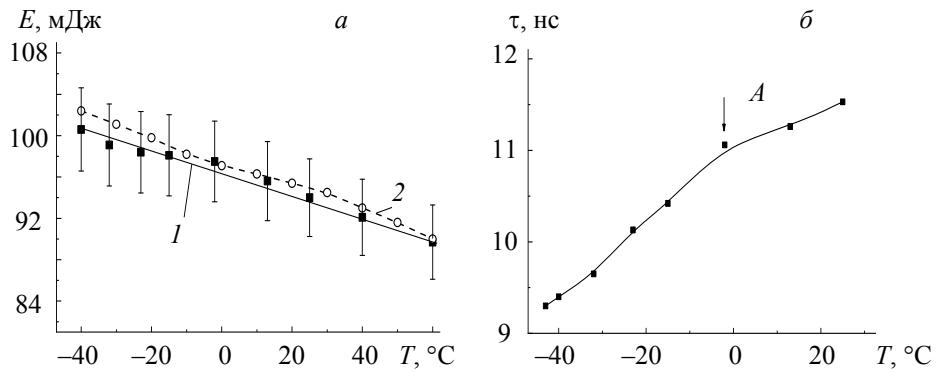


Рис. 4. Зависимость энергии E (а) и длительности τ (б) генерируемых импульсов от температуры T пассивного затвора на основе кристалла Cr⁴⁺:YAG: 1 — эксперимент, 2 — результат моделирования; $S_0 = 20$ % при комнатной температуре (25 °C)

Результаты и их обсуждение. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что одной из причин изменений мощности и длительности импульсов Nd:YAG-лазеров с пассивным модулятором добротности на основе кристалла Cr⁴⁺:YAG является зависимость начального пропускания S_0 затвора от температуры. При изменении T от -40 до $+60$ °C начальное пропускание увеличивается от 16.3 до 24.0 %. Зависимость $S_0(T)$ аппроксимируется прямой линией с тангенсом угла наклона $\text{tg}\alpha = 0.076$ %/град. Данное значение $\text{tg}\alpha$ одного порядка со средним значением тангенса угла наклона прямых (0.03 %/град), аппроксимирующих кривые $S_0(T)$ в интервале температур 20—150 °C для Cr⁴⁺:YAG по данным [9]. С учетом экспериментальных значений $S_0(T)$ проведено численное моделирование энергетических и временных характеристик Nd:YAG-лазера с пассивным затвором в виде кристалла Cr⁴⁺:YAG, температура которого изменяется до -40 до $+60$ °C. Система дифференциальных уравнений, соответствующая четырехуровневой схеме оптических переходов в кристаллах Nd:YAG и Cr⁴⁺:YAG, имеет вид [14, 15]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_2^{\text{Nd}}}{dt} &= W_p(N^{\text{Nd}} - N_2^{\text{Nd}}) - \frac{N_2^{\text{Nd}}}{\tau_2^{\text{Nd}}} - \frac{\sigma_{\text{em}}^{\text{Nd}} L_{\text{AE}} c_0}{V_0 L_0} Q_{\text{las}} N_2^{\text{Nd}}, \\ \frac{dN_2^{\text{Cr}}}{dt} &= \frac{\sigma_{\text{gs}}^{\text{Cr}} L_{\text{Cr}} c_0}{V_0 L_0} Q_{\text{las}} (N^{\text{Cr}} - N_2^{\text{Cr}}) - \frac{N_2^{\text{Cr}}}{\tau_2^{\text{Cr}}}, \\ \frac{dQ_{\text{las}}}{dt} &= \frac{\sigma_{\text{em}}^{\text{Nd}} L_{\text{AE}} c_0}{L_0} N_2^{\text{Nd}} Q_{\text{las}} - \frac{Q_{\text{las}}}{\tau} - \frac{\sigma_{\text{gs}}^{\text{Cr}} L_{\text{Cr}} c_0}{L_0} (N^{\text{Cr}} - N_2^{\text{Cr}}) Q_{\text{las}} - \frac{\sigma_{\text{es}}^{\text{Cr}} L_{\text{Cr}} c_0}{L_0} N_2^{\text{Cr}} Q_{\text{las}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $W_p = \eta_p \cdot P_p / [N^{Nd} V_p (hc_0 / \lambda_p)]$ — вероятность поглощения излучения накачки в пределах накачиваемого объема Nd:YAG-активного элемента; $V_p = (\pi d_{AE}^2 / 4) L_{AE}$, $L_0 = L_{cav} + L_{AE}(n_{AE} - 1) + L_{Cr}(n_{Cr} - 1)$, $1/\tau = (c_0/L_0)\ln[1/(1-\rho)] + (c_0/L_0)\ln(1/R)$, ρ — коэффициент внутренних оптических потерь за один обход резонатора (5 %); N_2^{Nd} — плотность населенности верхнего лазерного уровня $^4F_{3/2}$ (число возбужденных ионов Nd^{3+} в единице объема АЭ) в кристалле Nd:YAG; N_2^{Cr} — плотность населенности верхнего рабочего уровня в кристалле Cr⁴⁺:YAG; $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка; $c_0 = 3.0 \cdot 10^8$ м²/с — групповая скорость света.

При моделировании использованы следующие значения: $V_0 = (\pi d_0^2 / 4) L_0 = 4.3 \cdot 10^{-4}$ м³ — объем моды излучения Nd:YAG-лазера, $d_0^2 = 4.26$ мм — диаметр генерируемого пучка; $N^{Nd} = 1.2 \cdot 10^{26}$ м⁻³ — концентрация ионов Nd³⁺ в исследуемом АЭ; $N^{Cr} = 5 \cdot 10^{23}$ м⁻³ — концентрация ионов Cr⁴⁺ в исследуемом пассивном затворе; $L_0 \sim 0.3$ м — оптическая длина резонатора; $n_{AE} = 1.82$ — показатель преломления кристалла Nd:YAG; $n_{Cr} = 1.82$ — показатель преломления кристалла Cr⁴⁺:YAG; $P_p = 4000$ Вт — мощность излучения накачки (суммарная мощность излучения МЛД в блоке накачки лазера); $\eta_p = 0.7$ — эффективность накачки (доля мощности P_p , поглощенная в объеме АЭ и используемая при создании инверсионной населенности); $V_p \sim 55 \cdot 10^{-5}$ м³ — объем области возбуждения в кристалле Nd:YAG; $\lambda_p = 808$ нм — длина волны излучения накачки; $\sigma_{em}^{Nd} = 2.8 \cdot 10^{-23}$ м⁻² — сечение испускания для лазерного перехода кристалла Nd³⁺:YAG; $\sigma_{gs}^{Cr} = 4.3 \cdot 10^{-22}$ м⁻² и $\sigma_{es}^{Cr} = 8.2 \cdot 10^{-23}$ м⁻² — сечения поглощения из основного и возбужденного состояний для кристалла Cr⁴⁺:YAG на длине волны генерации; τ — время жизни фотонов в лазерном резонаторе; $\tau_2^{Nd} = 230 \cdot 10^{-6}$ с — время жизни верхнего лазерного уровня $^4F_{3/2}$ для ионов Nd³⁺; $\tau_2^{Cr} = 3.5 \cdot 10^{-6}$ с — время жизни рабочего уровня кристалла Cr⁴⁺:YAG на длине волны генерации; Q_{las} — число фотонов в единице объеме лазерной моды. Процедура моделирования выполнена с помощью программного пакета Wolfram Mathematica 12.

Как следует из рис. 4, а, кривая $E(T)$, полученная в результате моделирования, количественно и качественно согласуется с экспериментальной зависимостью энергии импульсов генерации Nd:YAG-лазера от температуры. Достаточно хорошее согласие с экспериментом получено и при моделировании зависимости длительности импульсов генерации от температуры.

Выяснение механизма температурного падения $S_0(T)$ осложняется отсутствием необходимых данных о температурных зависимостях скоростей переходов, определяющих процесс просветления в кристалле Cr⁴⁺:YAG. Кроме того, с уменьшением T становится менее вероятным процесс поглощения из возбужденного состояния [16, 17]. С целью выявления особенностей температурных вариаций параметров Cr⁴⁺:YAG необходимы более точные измерения. Тем не менее установление вида экспериментальных кривых $E(T)$, $\tau(T)$ и $S_0(T)$ позволяет более точно прогнозировать результаты температурного тестирования Nd:YAG-лазеров с пассивным модулятором добротности на основе кристалла Cr⁴⁺:YAG. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы также при анализе результатов ресурсных испытаний Nd:YAG-лазеров в широком температурном интервале.

Заключение. Экспериментально исследована зависимость начального пропускания S_0 пассивного затвора на основе кристалла Cr⁴⁺:YAG от температуры. Показано, что при изменении T от -40 до +60 °C начальное пропускание увеличивается от 16.3 до 24.0 %. Результирующая кривая $S_0(T)$ аппроксимируется прямой линией с тангенсом угла наклона 0.076 %/град. При фиксированном уровне накачки энергия генерируемых импульсов Nd:YAG-лазера с ростом температуры от -40 до +60 °C падает от 100 до 90 мДж (при этом кривая $E(T)$ допускает аппроксимацию прямой линией), длительность импульсов генерации τ возрастает от 9.3 до 12.0 нс. Зависимость длительности импульса генерации τ от температуры характеризуется небольшим изломом в области температур от -10 до 0 °C.

Для выяснения физических причин температурной зависимости начального пропускания кристалла Cr⁴⁺:YAG необходимы дальнейшие исследования. Полученные экспериментальные данные о зависимостях $S_0(T)$, $E(T)$ и $\tau(T)$ позволяют более точно, вплоть до количественных оценок, прогнозировать результаты температурных испытаний компактных Nd:YAG-лазеров с диодной накачкой.

Авторы выражают благодарность В. Д. Живулько за помощь в проведении спектральных измерений.

- [1] Е. В. Жариков, А. М. Забазнов, А. М. Прохоров, А. П. Шкадаревич, И. А. Щербаков. Квант. электрон., **13** (1986) 2347—2348
- [2] Н. Н. Ильичев, Э. С. Гулямова, П. П. Пашанин. Квант. электрон., **24** (1997) 1001—1006
- [3] В. В. Назаров, Л. В. Хлопонин, В. Ю. Храмов. Опт. журн., **76** (2009) 22—26
- [4] О. В. Буряк, А. Б. Ястребов. Кр. сообщения по физике ФИАН, **12** (2009) 12—16
- [5] М. В. Богданович, А. В. Григорьев, В. С. Калинов, О. Е. Костик, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, П. В. Шпак, Л. Л. Тепляшин, М. А. Щемелев. Журн. прикл. спектр., **86** (2019) 58—65 [M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, V. S. Kalinov, O. E. Kostik, K. I. Lantsov, K. V. Lepchenkov, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, P. V. Shpak, L. L. Teplyashin, M. A. Shchemelev. J. Appl. Spectr., **86** (2019) 50—55]
- [6] J. Tang, Zh. Bai, D. Zhang, Y. Qi, J. Ding, Y. Wang, Zh. Lu. Photonics, **8** (2021) 1—14
- [7] M. Bass, L. S. Weichman, S. Vigil, B. Brickeen. IEEE J. Quantum Electron., **39** (2003) 741—748
- [8] G. S. Boltayev, Sh. D. Payziyev, Sh. R. Kamolov, A. A. Sherniyozov, Sh. Reyimboyev, B. R. Sobirov, Y. A. Buriev, A. G. Aliboyev, F. M. Kamoliddinov, H. O. Sherniyozov, M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev. Uzbek J. Physics, **24** (2022) 290—293
- [9] M. Tsunekane, T. Taira. Conf. Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conf., OSA Technical Digest (CD) (Optica Publishing Group, 2009), paper JTud8, **308** (2013) 26—29
- [10] M. Nie, Q. Liu, E. Ji, M. Gong. Appl. Opt., **54** (2015) 8383—8387
- [11] Затворы лазерные пассивные. Методы измерений и контроля параметров. Государственный стандарт РФ (ГОСТ Р 50737-95), Москва, изд-во стандартов (1995)
- [12] H. Eilers, K. R. Hoffman, W. M. Dennis, S. M. Jacobsen, W. M. Yen. Appl. Phys. Lett., **61** (1992) 2958
- [13] T. V. Bezyazynchyna, M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, V. V. Kabanov, O. E. Kostik, Y. V. Lebiadok, K. V. Lepchenkov, V. V. Mashko, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, M. A. Shchemelev, L. L. Teplyashin. Opt. Commun., **308** (2013) 26—29
- [14] М. В. Богданович, А. В. Григорьев, К. И. Ланцов, Е. В. Лебедок, К. В. Лепченков, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, М. А. Щемелев. Журн. прикл. спектр., **82** (2015) 538—542 [M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, K. I. Lantsov, Y. V. Lebiadok, K. V. Lepchenkov, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, M. A. Shchemelev. J. Appl. Spectr., **82** (2015) 573—577]
- [15] М. В. Богданович, А. А. Изынеев, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, А. Г. Рябцев, В. Н. Павловский, П. И. Садовский, И. Е. Свитенков, М. А. Щемелев. Журн. прикл. спектр., **85** (2018) 55—62 [M. V. Bogdanovich, A. A. Izyneev, K. I. Lantsov, K. V. Lepchenkov, A. G. Ryabtsev, V. N. Pavlovskii, P. I. Sadovskii, I. E. Svitenskii, M. A. Shchemelev. J. Appl. Spectr., **85** (2018) 48—54]
- [16] M. Hercher. Appl. Opt., **6** (1967) 947—954
- [17] G. Xiao, M. Bass. IEE J. Quantum Electron., **33** (1997) 41—44