Научная статья
Research Article

ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2023. Том 90. № 8. С. 17–28
OPTICHESKII ZHURNAL. 2023. V. 90. № 8. Pp. 17–28

Оптический журнал

Лазерная физика и техника
Laser physics and engineering

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-08-17-28
УДК 535.37+621.371.378

Одномодовая генерация в диоднонакачиваемых лазерах на основе алюмината иттрия, допированного неодимом, и иттербий-эрбиевого стекла с пассивной модуляцией добротности

Максим Владимирович Богданович[1], Александр Викторович Григорьев[2], Валерий Николаевич Дудиков[3], Андрей Геннадьевич Рябцев[4], Геннадий Иванович Рябцев[5]✉, Павел Олегович Татура[6], Леонид Леонидович Тепляшин[7], Павел Валерьевич Шпак[8], Максим Анатольевич Щемелев[9]

Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

[1]*m.bogdanovich@ifanbel.bas-net.by* *https://orcid.org/0000-0002-1865-8447*
[2]*ibebedo@gmail.com* *https://orcid.org/0009-0006-9864-8404*
[3]*dudikov.vn@gmail.com* *https://orcid.org/0009-0006-0653-3301*
[4]*ryabtsev@dragon.bas-net.by* *https://orcid.org/0009-0006-5898-4470*
[5]*gennadii.ryabtsev@dragon.bas-net.by* *https://orcid.org/0000-0001-9105-1732*
[6]*pashatatura@gmail.com* *https://orcid.org/0009-0006-0252-0693*
[7]*teplyashin@imaph.bas-net.by* *https://orcid.org/0009-0006-3336-3440*
[8]*p.shpak@dragon.bas-net.by* *https://orcid.org/ 0009-0007-9453-7018*
[9]*maksimshch@gmail.com* *https://orcid.org /0009-0007-6603-4237*

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены два типа лазеров с поперечной диодной накачкой: лазеры с активным элементом из алюмината иттрия, допированного неодимом, и пассивным Cr^{4+}:YAG-модулятором добротности (длина волны генерации 1064 нм) и лазеры с активным элементом из иттербий-эрбиевого стекла и пассивным Co^{2+}:$MgAl_2O_4$-модулятором добротности (1535 нм). **Цель работы** — исследование селектирующих свойств резонаторов твёрдотельных диоднонакачиваемых лазеров, моноимпульсы которых формируются модуляторами добротности в виде просветляющихся фильтров. **Метод.** Экспериментально определены условия, при которых в лазерных резонаторах устанавливаются режимы одномодовой/одночастотной генерации. Путём моделирования оценены временные интервалы, характеризующие процессы развития моноимпульсов в лазерах с просветляющимися фильтрами/затворами, и число проходов импульсов излучения по резонаторам до момента достижения максимальной мощности генерируемого излучения. **Основные результаты.** Показано, что генерируемое излучение в резонаторе иттербий-эрбиевого лазера с фильтром Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ формируется в более длительный промежуток времени, чем в резонаторе неодимового лазера с фильтром Cr^{4+}:YAG, что позволяет задавать одномодовый/одночастотный режим генерации иттербий-эрбиевого лазера без введения в резонатор дополнительных частотно-зависимых элементов. Одномодовый режим генерации Nd:YAG-лазера устанавливается при добавлении в резонатор интерференционно-поляризационного фильтра Лио с фазовой пластинкой в виде активного элемента с термонаведённым двулучепреломлением и поляризатором. **Практическая значимость.** Полученные данные (эксперимент и моделирование)

могут быть использованы при разработке и создании компактных узкополосных диоднонакачиваемых лазеров для ближней инфракрасной области, в том числе, и для условно безопасного спектрального диапазона.

Ключевые слова: твёрдотельный лазер, допированный неодимом алюминат иттрия, иттербий-эрбиевое стекло, пассивный модулятор добротности, поперечная диодная накачка, одномодовое лазерное излучение

Благодарность: работа выполнялась при поддержке ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций, задание 1.4» и проекта БРФФИ Ф21УЗБГ–025. Авторы выражают благодарность К.И. Ланцову за помощь в работе.

Ссылка для цитирования: Богданович М.В., Григорьев А.В., Дудиков В.Н., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Татура П.О., Тепляшин Л.Л., Шпак П.В., Щемелев М.А. Одномодовая генерация в диоднонакачиваемых лазерах на основе алюмината иттрия, допированного неодимом, и иттербий-эрбиевого стекла с пассивной модуляцией добротности // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 8. С. 17–28. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-08-17-28

Коды OCIS: 140.3480, 140.3540, 140.3580, 140.3430.

Single-mode lasing in the diode-pumped passive Q-switch lasers based on neodymium doped yttrium aluminate and ytterbium-erbium glass active elements

Maxim Bogdanovich[1], Alexandr Grigor'ev[2], Valery Dudikov[3], Andrew Ryabtsev[4], Gennadii Ryabtsev[5]✉, Pavel Tatura[6], Leonid Teplyashin[7], Pavel Shpak[8], Maxim Shchemelev[9]

B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

[1]*m.bogdanovich@ifanbel.bas-net.by* *https://orcid.org/0000-0002-1865-8447*
[2]*ibebedo@gmail.com* *https://orcid.org/0009-0006-9864-8404*
[3]*dudikov.vn@gmail.com* *https://orcid.org/0009-0006-0653-3301*
[4]*ryabtsev@dragon.bas-net.by* *https://orcid.org/0009-0006-5898-4470*
[5]*gennadii.ryabtsev@dragon.bas-net.by* *https://orcid.org/0000-0001-9105-1732*
[6]*pashatatura@gmail.com* *https://orcid.org/0009-0006-0252-0693*
[7]*teplyashin@imaph.bas-net.by* *https://orcid.org/0009-0006-3336-3440*
[8]*p.shpak@dragon.bas-net.by* *https://orcid.org/ 0009-0007-9453-7018*
[9]*maksimshch@gmail.com* *https://orcid.org /0009-0007-6603-4237*

Abstract

Subject of study. Two types of transversally diode pumped lasers, namely Nd:YAG laser with Cr^{4+}:YAG passive Q-switch (the lasing wavelength is 1064 nm) and Yb,Er-glass laser with Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ passive Q-switch (1535 nm) have been considered. **Purpose of the study** is experimental and theoretical investigation of the spectral selection properties of the solid-state lasers, the monopulses of which are formed by the bleaching filters. **Method.** The conditions for single frequency lasing in laser cavity were defined. The time intervals characterizing the evolution of the monopulses in the cavity of lasers with the bleaching filters, as well as the number of the related radiation trips within the cavities up to the moment of achievement of maximum lasing power were determined by numerical simulation. **Main results.** Based on these data it has been shown that the lasing regime within the cavity of the Yb,Er glass laser with the Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ passive Q-switch is set for a longer period of time compared to the Nd:YAG laser with Cr^{4+}:YAG passive Q-switch. Therefore, the single-mode regime in the Yb,Er glass laser is realized without introducing an additional frequency-dependent element to the cavity. In contrast to this the single-mode regime in the Nd:YAG laser can be achieved by formation of interference-polarizing Lyot filter due to thermally-induced birefringence

of the active element and polarizer only. **Practical significance.** The obtained results are applicable for development and creation of compact single-frequency diode-pumped lasers operating within the near infrared spectral including the eye safety region.

Keywords: solid-state laser, Nd:YAG, Yb,Er-glass, passive Q-switch, transversal diode pump, single-mode laser radiation

Acknowledgment: the work was carried out with the support of the State Research Institute Program "Photonics and Electronics for Innovation, task 1.4" and the BRFFI F21UZBG–025 project. The authors express their gratitude to K.I. Lantsov for his help in the work.

For citation: Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Dudikov V.N., Ryabtsev A.G., Ryabtsev G.I., Tatura P.O., Teplyashin L.L., Shpak P.V., Shchemelev M.A. Single-mode lasing in the diode-pumped passive Q-switch lasers based on neodymium doped yttrium aluminate and ytterbium-erbium glass active elements [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 8. P. 17–28. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-08-17-28

OCIS codes: 140.3480, 140.3540, 140.3580, 140.3430.

ВВЕДЕНИЕ

Полностью твёрдотельные одномодовые/одночастотные моноимпульсные лазеры, генерирующие импульсы с шириной спектра порядка нескольких десятков мегагерц и энергией на уровне десятков миллиджоулей, относятся к источникам излучения, характеристики которых во многом определяют возможности современных спектрометров высокого разрешения, газоанализаторов дифференциального поглощения и допплеровских лидаров [1–6]. С целью минимизации энергопотребления и габаритов таких излучателей в качестве модуляторов добротности резонаторов во многих случаях выбирают пассивные затворы [7–9], которые, наряду с формированием моноимпульса излучения, позволяют реализовать режим «естественной» спектральной селекции мод [10, 11].

С подачей импульса возбуждения мощность излучения P в резонаторе лазера с пассивным затвором/фильтром линейно возрастает до момента времени t_0, когда выполняется условие генерации при непросветлённом фильтре [12–14]. При $t > t_0$ фильтр просветляется, мощность $P(t)$ испытывает нелинейный (экспоненциальный) рост и выделяются моды, конкурирующие между собой. Различие в коэффициентах потерь для взаимодействующих мод растёт с увеличением числа проходов N_{cav} генерируемых фотонов по резонатору вплоть до момента достижения максимальной мощности излучения P_{m} при $t = t_{\text{m}}$. Чем больше длительность $\Delta t = t_{\text{m}} - t_0$, тем сильнее проявляется «естественная» селекция продольных мод и сильнее сужается спектральная полоса генерации [12, 15, 16]. Величина N_{cav} может варьироваться от единиц до десятков тысяч проходов в зависимости от параметров резонатора, активного элемента (АЭ) и пассивного затвора.

Ранее спектрально-селектирующие характеристики пассивных затворов детально исследовались применительно, главным образом, к лазерам на рубине и неодимовом стекле, используя в качестве просветляющихся сред растворы криптоцианина и/или полиметиновых красителей [10, 12–16]. В настоящее время лазеры, в особенности с блоками диодной накачки, создаются в большинстве случаев на основе Nd:YAG-кристалла и/или Yb,Er-стекла [1–9]. В качестве пассивных затворов используются, как правило, кристаллические среды Cr^{4+}:YAG, LiF:LiF_2^- (длина волны генерации $\lambda_g = 1029 - 1064$ нм) или Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ ($\lambda_g \approx 1340 - 1540$ нм) [17–26]. Поэтому представляется важным оценить времена развития моноимпульсов для современных лазерных систем с пассивной модуляцией добротности.

Настоящая статья посвящена сравнительному анализу селектирующих свойств диоднонакачиваемых лазеров с активными элементами на основе Nd:YAG-кристалла и Yb,Er-стекла, моноимпульсы которых формируются модуляторами добротности в виде просветляющихся кристаллов Cr^{4+}:YAG и Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ соответственно.

Цель работы заключалась в исследовании селектирующих свойств резонаторов твёрдотельных диоднонакачиваемых лазеров, моноимпульсы которых формируются модуляторами добротности в виде просветляющихся

фильтров. В рамках модели скоростных дифференциальных уравнений для исследуемых лазерных систем определены значения временных интервалов $\Delta t_1 = t_{m1} - t_{01}$ (Nd:YAG, Cr^{4+}:YAG) и $\Delta t_2 = t_{m2} - t_{02}$ (Yb,Er-стекло, Co^{2+}:$MgAl_2O_4$). Сравнение эффективности селекции продольных мод для Nd:YAG- и Yb,Er-лазеров выполнено путём сопоставления результатов экспериментальных исследований условий формирования одномодовых/одночастотных режимов генерации со значениями временных интервалов Δt_1 и Δt_2.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментально исследовались лазеры на основе Nd:YAG-кристалла с пассивным затвором Cr^{4+}:YAG и на основе Yb,Er-стекла с пассивным затвором Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ (рис. 1). Возбуждение лазеров осуществлялось по поперечной схеме, используя матрицы (МЛД) или линейки (ЛЛД) лазерных диодов (НПП «Инжект», г. Саратов, РФ). Все исследования проводились при комнатной температуре окружающей среды (25 °C).

Прямоугольный активный элемент с концентрацией ионов Nd^{3+} 1,1 ат. % неодимового лазера помещался в отражатель и накачивался одной мощной МЛД. Длина волны излучения накачки $\lambda_p = 808$ нм. Длина Nd:YAG активного элемента $L_{AE} = 40$ мм, площадь поперечного сечения $S_{AE} = 4{\times}4$ мм^2. Торцы Nd:YAG активного элемента просветлялись на длину волны $\lambda_g = 1064$ нм. Длительность импульсов возбуждения составляла 230–250 мкс, частота следования импульсов $f \le 10$ Гц. Геометрическая длина резонатора Nd:YAG-лазера $L_{cav} = 120$ мм. Коэффициент отражения выходного зеркала $R_{out} = 40\%$. Оптические характеристики Nd:YAG-лазера анализировались при энергии выходных импульсов 9,0–11,0 мДж.

Активный элемент иттербий-эрбиевого лазера представлял собой прямоугольник, где $L_{AE} = 32$ мм, $S_{AE} = 1{\times}2$ мм^2. Накачка АЭ производилась шестью ЛЛД, по три ЛЛД с каждой из боковых сторон, $\lambda_p \approx 940$ нм, длительность импульсов возбуждения 3,5 – 4,0 мс, $f = 1$–2 Гц. Торцы АЭ просветлялись на длину волны $\lambda_g = 1535$ нм. Длина резонатора Yb,Er-лазера $L_{cav} = 120$ мм, $R_{out} = 70\%$. При данных исходных параметрах Yb,Er-лазер генерировал импульсы излучения с энергией 4,5–6,0 мДж.

Пассивные затворы для неодимового и иттербий-эрбиевого лазеров изготавливались в виде дисков диаметром 6 мм из кристаллов Cr^{4+}:YAG и Co^{2+}:$MgAl_2O_4$. Рабочие поверхности затворов просветлялись на длины волн генерации соответствующих лазерных источников. Варьируя толщину дисков, величину их начального пропускания T_0 можно было изменять от 0,3 до 0,8.

Применительно к представленным выше лазерам на Nd:YAG-кристалле с затвором

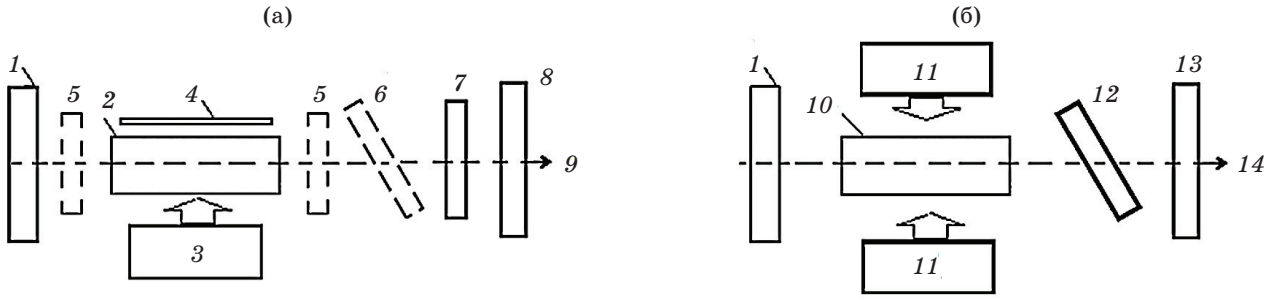

Рис. 1. Оптические схемы Nd:YAG-лазера с затвором Cr:YAG (а) и Yb,Er-лазера с затвором Co:$MgAl_2O_4$ (б), где *1* — «глухое» зеркало, *2* — Nd:YAG активный элемент, *3* — МЛД, *4* — отражатель блока накачки, *5* — фазовая пластинка $\lambda/4$, *6* — поляризатор, *7* — Cr:YAG пассивный затвор, *8* — выходное зеркало Nd:YAG-лазера, *9* — генерируемое излучение, $\lambda_g = 1064$ нм, *10* — АЭ на основе Yb,Er-стекла, *11* — ЛЛД, *12* — Co:$MgAl_2O_4$ пассивный затвор, *13* — выходное зеркало Yb,Er-лазера, *14* — генерируемое излучение, $\lambda_g = 1535$ нм

Fig. 1. Optical scheme of Nd:YAG laser with the Q-swich Cr:YAG (a) and the Yb,Er glass laser with the Q-switch Co:$MgAl_2O_4$ (б), where *1* — totally reflecting mirror, *2* — Nd:YAG active element, *3* — laser diode matrix, *4* — reflector of the pump unit, *5* — phase plate $\lambda/4$, *6* — polarizer, *7* — Cr:YAG passive Q-switch, *8* — output mirror of Nd:YAG laser, *9* — lasing radiation, $\lambda_g = 1064$ nm, *10* — AE based on Yb,Er-glass, *11* — laser diode array, *12* — Co:$MgAl_2O_4$ passive Q-switch, *13* — output mirror of Yb,Er glass laser, *14* — lasing radiation, $\lambda_g = 1535$ nm

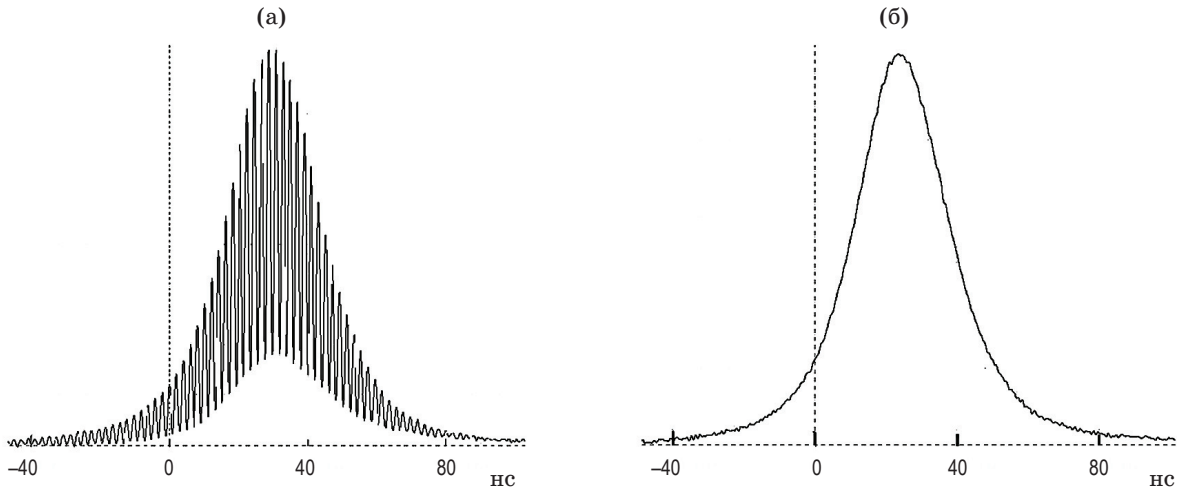

Рис. 2. Импульсы генерации Nd:YAG-лазера с пассивным затвором Cr^{4+}:YAG. (а) Поляризатор удалён из резонатора, (б) резонатор с двумя фазовыми пластинками и поляризатором, см. рис. 1а

Fig. 2. Generation pulses of Nd:YAG laser with passive Q-switch Cr^{4+}:YAG. (a) The polarizer is removed from the resonator, (б) the resonator with two phase plates and a polarizer, see Fig. 1a

Cr^{4+}:YAG и на Yb,Er-стекле с затвором $Co^{2+}:MgAl_2O_4$ изучались условия получения одномодового/одночастотного режима генерации.

В случае Nd:YAG-лазера одномодовый режим генерации достигался только при введении в резонатор дополнительных элементов — двух фазовых пластинок $\lambda/4$ и поляризатора. Как следует из рис. 2а, в резонаторе без фазовых пластинок и поляризатора устанавливается многомодовый режим генерации, на что однозначно указывает форма импульса излучения в виде большого числа отдельных амплитудных пичков. После введения в резонатор двух $\lambda/4$ пластинок и поляризатора Nd:YAG-лазер переключался в одномодовый режим, и контур импульса выходного излучения становился гладким (рис. 2б). Оценки, выполненные с помощью калиброванных интерферометров, показали, что ширина одномодовой линии генерации не превышала 60 МГц.

При надлежащей юстировке Yb,Er-лазера одномодовый режим генерации в его резонаторе формировался без введения каких-либо дополнительных элементов, а лишь путём установки фильтра под углом Брюстера. На выходе регистрировался гладкий импульс излучения длительностью 19–20 нс. Ширина спектральной линии, измеренная гетеродинным методом, составила приблизительно 40 МГц (рис. 3).

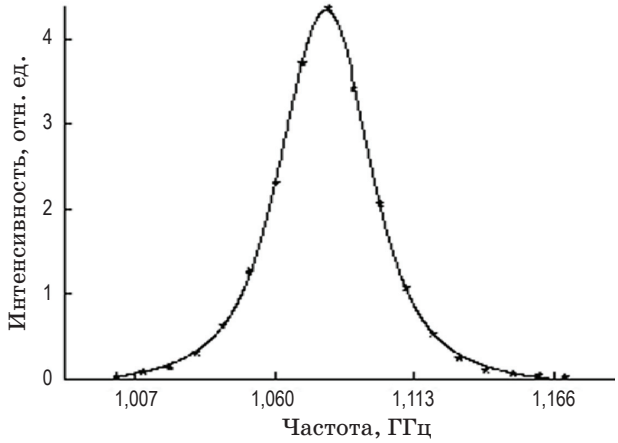

Рис. 3. Частотный спектр одномодовой генерации Yb,Er-лазера с пассивным затвором $Co:MgAl_2O_4$

Fig. 3. Frequency spectrum of single-mode generation of Yb,Er laser with passive Q-switch $Co:MgAl_2O_4$

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Процессы развития и формирования моноимпульсов неодимового и иттербий-эрбиевого лазеров с пассивными затворами в условиях поперечной диодной накачки моделировались системами скоростных дифференциальных уравнений, учитывающими как свойства активных элементов, так и свойства соответствующих просветляющихся фильтров.

Временная эволюция излучения лазера с АЭ на основе кристалла Nd:YAG и Cr^{4+}:YAG

пассивного затвора, начиная с момента подачи импульса накачки, анализировались в рамках соответствующих четырёхуровневых схем оптических переходов [27–32]:

$$\frac{dN_2^{\mathrm{Nd}}}{dt} = W_{\mathrm{p}}\left(N^{\mathrm{Nd}} - N_2^{\mathrm{Nd}}\right) - \frac{N_2^{\mathrm{Nd}}}{\tau_2^{\mathrm{Nd}}} - \frac{\sigma_{\mathrm{em}}^{\mathrm{Nd}} L_{\mathrm{AE}} c_0}{V_0 L_0} Q_{\mathrm{las}} N_2^{\mathrm{Nd}},$$

$$\frac{dN_2^{\mathrm{Cr}}}{dt} = \frac{\sigma_{\mathrm{gs}}^{\mathrm{Cr}} L_{\mathrm{Cr}} c_0}{V_0 L_0} Q_{\mathrm{las}} (N^{\mathrm{Cr}} - N_2^{\mathrm{Cr}}) - \frac{N_2^{\mathrm{Cr}}}{\tau_2^{\mathrm{Cr}}}, \tag{1}$$

$$\frac{dQ_{\mathrm{las}}}{dt} = \frac{\sigma_{\mathrm{em}}^{\mathrm{Nd}} L_{\mathrm{AE}} c_0}{L_0} N_2^{\mathrm{Nd}} Q_{\mathrm{las}} - \frac{Q_{\mathrm{las}}}{\tau} - \frac{\sigma_{\mathrm{gs}}^{\mathrm{Cr}} L_{\mathrm{Cr}} c_0}{L_0} (N^{\mathrm{Cr}} - N_2^{\mathrm{Cr}}) Q_{\mathrm{las}} - \frac{\sigma_{\mathrm{es}}^{\mathrm{Cr}} L_{\mathrm{Cr}} c_0}{L_0} N_2^{\mathrm{Cr}} Q_{\mathrm{las}}.$$

При рассмотрении работы Yb,Er-лазера с Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ пассивным затвором учитывались оптические переходы как в накачиваемой, так и в ненакачиваемой областях активного элемента [19, 24–28]:

$$\frac{dN_2^{\mathrm{Yb}}}{dt} = W_{\mathrm{p}}(N^{\mathrm{Yb}} - N_2^{\mathrm{Yb}}) - \frac{N_2^{\mathrm{Yb}}}{\tau_2^{\mathrm{Yb}}} - k_1 N_2^{\mathrm{Yb}} (N^{\mathrm{Er}} - N_2^{\mathrm{Er}} - N_3^{\mathrm{Er}}) - k_2 N_2^{\mathrm{Yb}} N_2^{\mathrm{Er}},$$

$$\frac{dN_2^{\mathrm{Er}}}{dt} = \frac{N_3^{\mathrm{Er}}}{\tau_3^{\mathrm{Er}}} - \frac{N_2^{\mathrm{Er}}}{\tau_2^{\mathrm{Er}}} - 2CN_2^{\mathrm{Er}} N_2^{\mathrm{Er}} - k_2 N \left\{ N_2^{\mathrm{Yb}} N_2^{\mathrm{Er}} + Q_{\mathrm{las}} \frac{c_0}{S_{\mathrm{AE}} L_0} \left[\sigma_{\mathrm{ab}}^{\mathrm{Er}} (N^{\mathrm{Er}} - N_2^{\mathrm{Er}} - N_3^{\mathrm{Er}}) - \sigma_{\mathrm{em}}^{Er} N_{\mathrm{Er}}^2 \right], \right.$$

$$\frac{dN_{\mathrm{Er}}^3}{dt} = k_1 N_{\mathrm{Yb}}^2 (N_{\mathrm{Er}} - N_{\mathrm{Er}}^2 - N_{\mathrm{Er}}^3) - A_{\mathrm{Er}}^{32} N_{\mathrm{Er}}^3 + k_2 N_{\mathrm{Yb}}^2 N_{\mathrm{Er}}^2 + CN_{\mathrm{Er}}^2 N_{\mathrm{Er}}^2,$$

$$\frac{dN_{\mathrm{Er_u}}^2}{dt} = Q_{\mathrm{las}} \frac{c_0}{S_{\mathrm{Er_u}} L_0} \left[\sigma_{\mathrm{Er}}^{\mathrm{abs}} (N_{\mathrm{Er}} - N_{\mathrm{Er_u}}^2) - \sigma_{\mathrm{Er}}^{\mathrm{em}} N_{\mathrm{Er_u}}^2 \right] - A_{\mathrm{Er}}^{21} N_{\mathrm{Er_u}}^2, \tag{2}$$

$$\frac{dN_{\mathrm{Co}}^2}{dt} = \frac{\sigma_{\mathrm{Co}}^{\mathrm{gsa}} c_0}{S_{\mathrm{Co}} L_0} Q_{\mathrm{las}} (N^{\mathrm{Co}} - N_2^{\mathrm{Co}}) - A_{\mathrm{Co}}^{21} N_{\mathrm{Co}}^2,$$

$$\frac{dQ_{\mathrm{las}}}{dt} = Q_{\mathrm{las}} \left\{ \frac{L_{\mathrm{Er}} c_0}{L_0} \left[\sigma_{\mathrm{Er}}^{\mathrm{em}} N_{\mathrm{Er}}^2 - \sigma_{\mathrm{Er}}^{\mathrm{abs}} (N_{\mathrm{Er}} - N_{\mathrm{Er}}^2 - N_{\mathrm{Er}}^3) \right] + \frac{L_{\mathrm{Er_u}} c_0}{L_0} \left[\sigma_{\mathrm{Er}}^{\mathrm{em}} N_{\mathrm{Er_u}}^2 - \sigma_{\mathrm{Er}}^{\mathrm{abs}} (N_{\mathrm{Er}} - N_{\mathrm{Er_u}}^2) \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{L_{\mathrm{Co}} c_0}{L_0} \left[\sigma_{\mathrm{Co}}^{\mathrm{gsa}} (N_{\mathrm{Co}} - N_{\mathrm{Co}}^2) - \sigma_{\mathrm{Co}}^{\mathrm{esa}} N_{\mathrm{Co}}^2 \right] - \frac{1}{\tau} \right\} + \delta_{\mathrm{las}} V_{\mathrm{Er}} A_{\mathrm{Er}}^{21} N_{\mathrm{Er}}^2 + \delta_{\mathrm{las}} V_{\mathrm{Er_u}} A_{\mathrm{Er}}^{21} N_{\mathrm{Er_u}}^2.$$

В (1) и (2) $W_{\mathrm{p}} = \eta_{\mathrm{p}} P_{\mathrm{p}} / [N^{\mathrm{Nd,Yb}} V_{\mathrm{p}} (hc_0/\lambda_{\mathrm{p}})]$ — вероятность поглощения мощности излучения накачки P_{p} в пределах накачиваемого объёма Vp для активных элементов на основе Nd:YAG или Yb,Er-стекла; $\eta_{\mathrm{p}} = 0{,}7$ — доля мощности P_{p}, поглощённая в объёме АЭ и используемая при создании инверсной населённости; $V\mathrm{p} = S_{\mathrm{AE}} L_{\mathrm{AE}}$; $L_0 = L_{\mathrm{cav}} + L_{\mathrm{AE}}(n_{\mathrm{AE}} - 1) + L_{\mathrm{Cr,Co}}(n_{\mathrm{Cr,Co}} - 1)$ — оптическая длина резонатора; $1/\tau = (c_0/L_0)\ln[1/(1-\rho)] + (c_0/L_0) \times \ln(1/(R_{\mathrm{out}})$, где ρ — коэффициент внутренних оптических потерь за один обход резонатора (5%) [33]; $V_0 = S_{\mathrm{AE}} L_0$ — объём генерируемой моды; k_1, k_2 — коэффициенты кумулятивного апконверсионного переноса энергии от ионов Yb^{3+} к ионам Er^{3+} в основном и возбуждённом состоянии соответственно. Обозначения других символов и значения ряда параметров систем (1), (2) представлены в работах [24, 25, 27, 28], а также в табл. 1. Процедура моделирования выполнялась с помощью программного пакета Wolfram Mathematica 12.

Типичный вид временно́й зависимости мощности $P(t)$ излучения, генерируемого в резонаторе, начиная с момента подачи импульса накачки, представлен на рис. 4 применительно к лазеру на Yb,Er-стекле с Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ пассивным затвором. Момент времени t_0, при котором выполняется условие порога генерации при непросветлённом фильтре и начинается нелинейный рост $P(t)$, а также момент достижения максимальной мощности излуче-

Таблица 1. Символы и параметры, использованные при моделировании оптических процессов в Nd:YAG-лазере с пассивным затвором Cr^{4+}:YAG и в Yb,Er -лазера с пассивным затвором Co^{2+}:$MgAl_2O_4$

Table 1. Symbols and parameters used during modelling of optical processes in Nd:YAG laser with passive Q-switch Cr^{4+}:YAG and in Yb,Er-laser with passive Q-switch Co^{2+}:$MgAl_2O_4$

Символ	Параметр	Типичное значение
N^{Nd}	Концентрация ионов Nd^{3+} в кристалле Nd-YAG, м$^{-3}$	$1{,}2\times10^{26}$
N^{Yb}, N^{Er}	Концентрации ионов Yb^{3+} и Er^{3+}в Yb,Er-стекле, м$^{-3}$	$2{,}0\times10^{27}$ и $3{,}0\times10^{25}$
N_2^{Nd}	Плотность населённости верхнего лазерного уровня $^4F_{3/2}$ (число возбуждённых ионов Nd^{3+} в единице объёма АЭ) в Nd:YAG-кристалле	–
N_2^{Yb}, N_2^{Er}	Плотности населённости уровней $^2F_{5/2}$ и $^2I_{13/2}$ в Yb,Er-стекле	–
N^{Cr}	Концентрация ионов Cr^{4+} в Cr^{4+}:YAG-кристалле, м$^{-3}$	5×10^{23}
N_2^{Cr}	Плотность населённости верхнего рабочего уровня в Cr^{4+}:YAG-кристалле	–
N^{Co}	Концентрация Co^{2+} в Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ кристалле, м$^{-3}$	$1{,}73\times10^{24}$
N_2^{Co}	Плотность населённости верхнего рабочего уровня в Co^{2+}:$MgAl_2O_4$-кристалле	–
n_{AE} (Nd), n_{Cr}	Показатели преломления Nd:YAG и Cr^{4+}:YAG	1,82 и 1,82
n_{AE} (Er), n_{Co}	Показатели преломления Yb,Er-стекло и Co^{2+}:$MgAl_2O_4$	1,53 и 1,69
h	Постоянная Планка, Дж с	$6{,}626\times10^{-34}$
c_0	Групповая скорость света, м/с	$3{,}0\times10^{8}$
σ_{em}^{Nd}	Сечение испускания для лазерного перехода кристалла Nd^{3+}:YAG, м^2	$2{,}8\times10^{-23}$
σ_{es}^{Cr}	Сечение поглощения из возбуждённого состояния для кристалла Cr^{4+}:YAG на длине волны генерации, м^2	$8{,}2\times10^{-23}$
σ_{gs}^{Cr}	Сечение поглощения из основного состояния для кристалла Cr^{4+}:YAG на длине волны генерации, м^2	$4{,}3\times10^{-22}$
τ	Время жизни фотонов в лазерном резонаторе	–
τ_2^{Nd}	Время жизни верхнего лазерного уровня $^4F_{3/2}$ для ионов Nd^{3+}, с	230×10^{-6}
τ_2^{Cr}	Время жизни рабочего уровня кристалла Cr^{4+}:YAG на длине волны генерации, с	$3{,}5\times10^{-6}$
Q_{las}	Число фотонов в единице объема лазерной моды	–

Таблица 2. Число проходов импульса N_{cav}^1 излучения по резонатору Nd:YAG-лазера с Cr^{4+}:YAG пассивным затвором при различных значениях начального пропускания T_0

Table 2. Number of passes of the radiation pulse N_{cav}^1 through the cavity of Nd:YAG laser with Cr^{4+}:YAG passive Q-switch for different values of the initial transmission T_0

N_{cav}^1	4361	3417	3192	3033	2915	2826
T_0	0,40	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70

Таблица 3. Число проходов N^2_{cav} импульса излучения по резонатору иттербий-эрбиевого лазера с Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ пассивным затвором при различных значениях начального пропускания T_0

Table 3. Number of passes of the radiation pulse N^2_{cav} through the cavity of the ytterbium-erbium laser with Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ passive Q-switch for different values of the initial transmission T_0

N^2_{cav}	74710	34793	26803	22862	20418	18720
T_0	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80

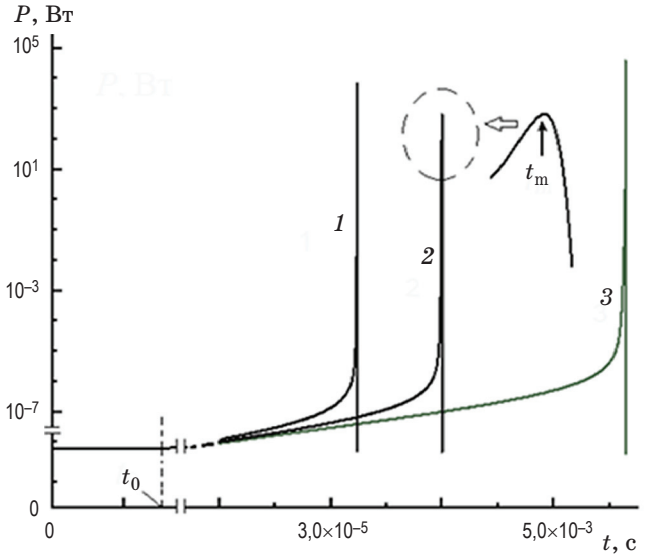

Рис. 4. Рассчитанная зависимость мощности излучения P, формируемого в резонаторе Yb,Er-лазера с пассивным затвором на основе кристалла Co^{2+}:$MgAl_2O_4$, от времени t. Начальное пропускание затвора $T_0 = 77\%$ (*1*), $T_0 = 76\%$ (*2*) и $T_0 = 75\%$ (*3*)

Fig. 4. Calculated dependence of the radiation power P generated in the Yb,Er laser resonator with a passive Q-switch based on a Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ crystal on time t. The initial transmission $T_0 = 77\%$ (*1*), $T_0 = 76\%$ (*2*) and $T_0 = 75\%$ (*3*)

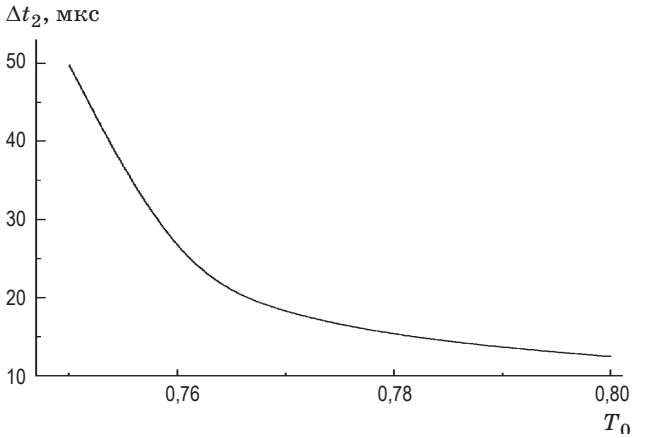

Рис. 5. Рассчитанная зависимость времени $\Delta t_2 = t_m - t_0$ для иттербий-эрбиевого лазера с Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ модулятором добротности от величины начального пропускания пассивного затвора T_0

Fig. 5. Calculated dependence of the time $\Delta t_2 = t_m - t_0$ for an ytterbium-erbium laser with a Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ Q-factor modulator on the value of the initial transmission of the passive Q-switch T_0

ния t_m, устанавливались программными методами. Используя значения t_0 и t_m, находились интервалы Δt_1 (Nd:YAG, Cr^{4+}:YAG) и Δt_2 (Yb,Er-стекло, Co^{2+}:$MgAl_2O_4$) и для соответствующей оптической длины резонатора L_0 определялось число проходов $N^{1,2}_{cav}$ импульса излучения по резонатору лазера (табл. 2 и 3).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты сопоставления значений временных интервалов Δt_1 и Δt_2, а также числа проходов импульсов излучения в резонаторе N^1_{cav} и N^2_{cav} свидетельствуют о том, что при сравнимых исходных рабочих параметрах генерируемое излучение в резонаторе Yb,Er-лазера с фильтром Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ формируется в течение более длительного промежутка времени, чем в резонаторе Nd:YAG-лазера с фильтром Cr^{4+}:YAG: $\Delta t_2 >> \Delta t_1$, $N^2_{cav} >> N^1_{cav}$ (табл. 2 и 3 , рис. 5). Как следствие, этап нелинейного роста мощности $P(t)$ иттербий-эрбиевого лазера завершается выделением одной наиболее интенсивной моды. Контур выходного импульса сглаживается, а спектр полосы генерации сильно сужается (рис. 2б и 3). Поэтому при задании одномодового/одночастотного режима генерации в Yb,Er-лазере, как правило, нет необходимости вводить в резонатор дополнительные частотно-зависимые компоненты [9]. Единственной особенностью схемы ит-

тербий-эрбиевого лазера, представленной на рис. 1б, является установление пассивного затвора (поз. *12*) в резонаторе под углом Брюстера с целью минимизации оптических потерь на отражение в дополнение к процедуре просветления.

Временно́й интервал Δt_1, в пределах которого происходит нелинейный рост $P(t)$ исследованного неодимового лазера, более чем на порядок короче интервала Δt_2 (Yb,Er-лазер) при сравнимых значениях T_0. Пассивный затвор в виде Cr^{4+}:YAG-фильтра успевает просветлиться до завершения процесса конкуренции продольных мод излучения. Если в резонаторе отсутствуют специальные частотно-селективные элементы, лазер генерирует в многомодовом режиме, и в выходном импульсе проявляют себя большое число различных по интенсивности амплитудных пичков (рис. 2а). В наших экспериментах с целью интенсификации частотной селекции в резонаторе неодимового лазера формировался интерференционно-поляризационный фильтр Лио с фазовой пластинкой в виде лазерного активного элемента с термонаведённым двулучепреломлением (поз. *2*) и поляризатора (поз. *6* на рис. 1а) [34]. Радиальный температурный градиент в объёме активного элемента усиливался путём возбуждения АЭ с одной боковой стороны. Взаимодействие процесса «естественной селекции мод» и фильтра Лио обеспечивает устойчивое функционирование Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности в режиме одномодовой генерации (ширина полосы генерации составляет менее 60 МГц). Применение двух пластинок $\lambda/4$ (поз. *5* на рис. 1а) позволяет минимизировать влияние стоячей волны на процесс частотной селекции и увеличить выходную энергию.

Полученные данные (эксперимент и моделирование) могут быть использованы при разработке и создании компактных узкополосных диоднонакачиваемых лазеров для ближней инфракрасной области, в том числе и для условно безопасного для органов зрения спектрального диапазона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кравцов Н.В., Наний О.Е. Высокостабильные одночастотные твердотельные лазеры // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 4. С. 322–344. https://doi.org/10.1070/QE1993v023n04ABEH002992
2. Анциферов В.В. Мощные одночастотные перестраиваемые твердотельные лазеры // Журнал технической физики. 1998. Т. 68. № 10. С. 74–79.
3. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 232 с.
4. Schroder T., Lemmerz C., Reitebuch O., Wirth M., Wuhrer C., Treichel R. Frequency jitter and spectral width of an injection-seeded Q-switched Nd:YAG laser for Doppler wind lidar // Appl. Phys. B. 2007. V. 87. P. 437–444. https://doi.org/10.1007/s00340-007-2627-5
5. Reitebuch O., Lemmerz Ch., Nagel E., Paffrath U., Durand Y., Endemann M., Fabre F., Chaloupy M. The airborne demonstrator for the direct–detection Doppler wind lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part I: Instrument design and comparison to satellite instrument // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. V. 26. P. 2501–2515. https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1309.1
6. Банах В.А., Разенков И.А. Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния. II. Конструкция и эксперимент // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 2. С. 113–119.
7. Богданович М.В., Григорьев А.В., Ланцов К.И., Лепченков К.В., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Титовец В.С., Щемелев М.А. Портативные твердотельные лазеры с диодной накачкой // Фотоника. 2016. Т. 55. № 1. С. 58–63.
8. Богданович М.В., Григорьев А.В., Калинов В.С., Костик О.Е., Ланцов К.И., Лепченков К.В., Рябцев А.Г.,

REFERENCES

1. Kravtsov N.V., Nanii O.E. High-stability single-frequency solid-state lasers // Quantum Electronics. 1993. V. 23. № 4. P. 272–291. https://doi.org/10.1070/QE1993v023n04ABEH002992
2. Antsiferov V.V. High power single frequency tunable solid-state lasers // Technical Physics. 1998. V. 43. № 10. P. 1203–1208.
3. Zuev V.E., Zuev V.V. Remote optical sensing of the atmosphere. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. 232 p.
4. Schroder T., Lemmerz C., Reitebuch O., Wirth M., Wuhrer C., Treichel R. Frequency jitter and spectral width of an injection-seeded Q-switched Nd:YAG laser for Doppler wind lidar // Appl. Phys. B. 2007. V. 87. P. 437–444. https://doi.org/10.1007/s00340-007-2627-5
5. Reitebuch O., Lemmerz Ch., Nagel E., Paffrath U., Durand Y., Endemann M., Fabre F., Chaloupy M. The airborne demonstrator for the direct–detection Doppler wind lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part I: Instrument design and comparison to satellite instrument // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. V. 26. P. 2501–2515. https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1309.1
6. Banakh V.A., Razenkov I.A. Aerosol lidar for study of the backscatter amplification in the atmosphere. Part II. Construction and experiment // Atmospheric and Ocean Optics. 2015. V. 28. № 2. P. 113–119.
7. Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Lantsov K.I., Lepchenkov K.V., Ryabtsev A.G., Ryabtsev G.I., Tsitavets U.S., Shchemelev M.A. Portable diode-pumped solid-state lasers // Photonics. 2016. V. 55. № 1. P. 58–63.
8. Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Kalinov V.S., Kostik O.E., Lantsov K.I., Ryabtsev A.G., Ryabtsev G.I.,

Рябцев Г.И., Шпак П.В., Тепляшин Л.Л., Щемелев М.А. Одночастотный моноимпульсный YAG:Nd-лазер с кольцевым резонатором и поперечной диодной накачкой // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86. № 1. С. 58–65. https://doi.org/10.1007/s10812-019-00779-4

9. Батура Е.О., Богданович М.В., Григорьев А.В., Дудиков В.Н., Ланцов К.И., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Шпак П.В., Тепляшин Л.Л., Щемелев М.А., Садовский П.И. Одночастотный Yb,Er-лазер с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности // Журнал прикладной спектроскопии. 2021. Т. 88. № 1. С. 57–64. https://doi.org/10.1007/s10812-021-01139-x
10. Soffer B.H. Giant pulse laser operation by a passive, reversibly bleachable absorber // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. № 8. P. 2551. https://doi.org/10.1063/1.1702903
11. Sooy W.R. The natural selection of modes in a passive Q-switched laser // Appl. Phys. Letters. 1965. V. 7. № 2. P. 36–37. https://doi.org/10.1063/1.1754286
12. Пилипович В.А., Ковалев А.А. Оптические квантовые генераторы с просветляющимися фильтрами. Минск: Наука и техника, 1975. 216 с.
13. Тарасов Л.В. Физика лазера. Изд. 2–е, испр. и доп. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2010. 456 с.
14. Svelto O. Principles of lasers. 5th ed. Springer, New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2010. 620 p.; https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1302-9
15. Berry A.J., Hanna D.C., Sawyers C.C. High power single frequency operation of a Q-switched TEM00 mode Nd:YAG laser // Optics Communications. 1981. V. 40. № 1. P. 54–58. https://doi.org/10.1016/0030-4018(81)90270-4
16. Bjorkholm J.E., Stolen R.H. A simple single-mode giant-pulse ruby laser // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. № 8. P. 4043–4044. https://doi.org/10.1063/1.1656911
17. Кисель В.Э., Ясюкевич А.С., Кондратюк Н.В., Кулешов Н.В. Высокочастотный Yb-микролазер с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 11. С. 1018–1022. https://doi.org/10.1070/QE2009v039n11ABEH014151
18. Dascalu T., Pavel N., Lupei V., Philipps G., Beck Th., Weber H. Investigation of a passive Q-switched, externally controlled, quasicontinuous or continuous pumped Nd:YAG laser // Opt. Eng. 1996. V. 35. № 5. P. 1247–1251. https://doi.org/10.1117/1.600670
19. Zhang X., Zhao Sh., Wang Q., Zhang Q., Sun L., Zhang Sh. Optimization of Cr^{4+}-doped saturable-absorber Q-switched lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1997. V. 33. № 12. P. 2286–2294. https://doi.org/10.1109/3.644112
20. Tsunekane M., Taira T. Direct measurement of temporal transmission distribution of a saturable absorber in a passively Q-switched laser // IEEE J. Quantum Electron. 2016. V. 52. № 5. P. 5200107 (1–7). http://doi.org/10.1109/JQE.2016.2541922
21. Dong J., Deng P., Xu J., Gan F. Investigation of absorption spectra of (Cr^{4+},Yb^{3+}):YAG crystal // Proceeding of SPIE. 1999 (Int. Conf. on Industrial Lasers, 8 September 1999). V. 3862. P. 194–198. http://doi.org/10.1117/12.361135
22. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Kuleshov N.V., Moncorge R. Excited state absorption and passive Q-switch performance of Co^{2+} doped oxide crystals // J. of Alloys and Compounds. 2002. V. 341. P. 366–370. https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00039-7
23. Goldstein A., Loiko P., Burshtein Z., Skoptsov N., Glazunov I., Galun E., Kuleshov N., Yumashev K. Development of saturable absorbers for laser passive Q-switching near 1.5 μm based on transparent ceramic

Shpak P.V., Teplyashin L.L. Single-frequency side-diode-pumped monopulse Nd:YAG laser with a ring cavity // Journal of Applied Spectroscopy. 2019. V. 86. № 1. P. 50–55. https://doi.org/10.1007/s10812-019-00779-4

9. Batura E.O., Bogdanovich M.V., Grigor’ev A.V., Dudikov V.N., Lantsov K.I., Ryabtsev A.G., Ryabtsev G.I., Shpak P.V., Teplyashin L.L, Shchemelev M.A., Sadovskii P.I. Single-frequency transversally diode pumped Yb,Er-laser with passive Q-switching unit // Journal of Applied Spectroscopy. 2021. V. 88. № 1. P. 57–64. https:// doi.org/10.1007/s10812-021-01139-x
10. Soffer B.H. Giant pulse laser operation by a passive, reversibly bleachable absorber // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. № 8. P. 2551. https://doi.org/10.1063/1.1702903.
11. Sooy W.R. The natural selection of modes in a passive Q-switched laser // Appl. Phys. Letters. 1965. V. 7. № 2. P. 36–37. https://doi.org/10.1063/1.1754286
12. Pilipovich V.A., Kovalyev A.A. Optical quantum generators with bleaching filters. Minsk: Nauka i technika, 1975. 216 p.
13. Tarasov L.V. Physics of Laser. 2nd Ed., corrected and supplemented. M.: Kniznyi dom “LIBROKOM”, 2010. 456 p.
14. Svelto O. Principles of lasers. 5th Ed. Springer, New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2010. 620 p.
15. Berry A.J., Hanna D.C., Sawyers C.C. High power single frequency operation of a Q-switched TEM00 mode Nd:YAG laser // Optics Communications. 1981. V. 40. № 1. P. 54–58. https://doi.org/10.1016/0030-4018(81)90270-4
16. Bjorkholm J.E., Stolen R.H. A simple single-mode giant-pulse ruby laser // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. № 8. P. 4043–4044. https://doi.org/10.1063/1.1656911.
17. Kisel V.E., Yasukevich A.S., Kondratyuk N.V., Kuleshov N.V. Diode-pumped passively Q-switched high-repetition-rate Yb microchip laser // Quantum Electronics. 2009. V. 39. № 11. P. 1018–1022. https://doi.org/10.1070/QE2009v039n11ABEH014151
18. Dascalu T., Pavel N., Lupei V., Philipps G., Beck Th., Weber H. Investigation of a passive Q-switched, externally controlled, quasicontinuous or continuous pumped Nd:YAG laser // Opt. Eng. 1996. V. 35. № 5. P. 1247–1251. https://doi.org/10.1117/1.600670
19. Zhang X., Zhao Sh., Wang Q., Zhang Q., Sun L., Zhang Sh. Optimization of Cr^{4+}-doped saturable-absorber Q-switched lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1997. V. 33. № 12. P. 2286–2294. https://doi.org/10.1109/3.644112
20. Tsunekane M., Taira T. Direct measurement of temporal transmission distribution of a saturable absorber in a passively Q-switched laser // IEEE J. Quantum Electron. 2016. V. 52. № 5. P. 5200107 (1–7). http://doi.org/10.1109/JQE.2016.2541922
21. Dong J., Deng P., Xu J., Gan F. Investigation of absorption spectra of (Cr^{4+},Yb^{3+}):YAG crystal // Proceeding of SPIE. 1999 (Int. Conf. on Industrial Lasers, 8 September 1999). V. 3862. P. 194–198. http://doi.org/10.1117/12.361135
22. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Kuleshov N.V., Moncorge R. Excited state absorption and passive Q-switch performance of Co^{2+} doped oxide crystals // J. of Alloys and Compounds. 2002. V. 341. P. 366–370. https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00039-7
23. Goldstein A., Loiko P., Burshtein Z., Skoptsov N., Glazunov I., Galun E., Kuleshov N., Yumashev K. Development of saturable absorbers for laser passive Q-switching near 1.5 μm based on transparent ceramic

Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ // J. Am. Ceram. Soc. 2016. V. 99. № 4. P. 1324–1331. https://doi.org/10.1111/jace.14102
24. Ryabtsev G.I., Bezyazychnaya T.V., Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Kabanov V.V., Lebiadok Y.V., Ryabtsev A.G., Shchemelev M.A. Optimized diode-pumped passive Q-switched ytterbium-erbium glass laser // Appl. Phys. B. 2012. V. 108. P. 283–288. http://doi.org/10.1007/s00340-012-5036-3
25. Богданович М.В., Изынеев А.А., Ланцов К.И., Лепченков К.В., Рябцев А.Г., Павловский В.Н., Садовский П.И., Свитенков И.Е., Щемелев М.А. Влияние температуры на оптические параметры Yb,Er-лазера с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности // Журнал прикладной спектроскопии. 2018. Т. 85. № 1. С. 56–63. https://doi.org/10.1007/s10812-018-0610-z
26. Кисель В.Э., Щербицкий В.Г., Кулешов Н.В., Постнова Л.И., Левченко В.И., Галаган Б.И., Денкер Б.И., Сверчков С.Е. Пассивные затворы для модуляции добротности лазера на эрбиевом стекле с диодной накачкой // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 7. С. 611–614. https://doi.org/10.1070/QE2005v035n07ABEH008954
27. Богданович М.В., Григорьев А.В., Ланцов К.И., Лебедок Е.В., Лепченков К.В., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Щемелев М.А. Усиленная люминесценция и паразитные моды генерации в активном элементе YAG:Nd-лазера с поперечной диодной накачкой // Журнал прикладной спектроскопии. 2015. Т. 82. № 4. С. 538–542. https://doi.org/10.1007/s10812-015-0147-3
28. Богданович М.В., Григорьев А.В., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Шпак П.В., Щемелев М.А., Лепченков К.В., Ланцов К.И., Дудиков В.Н., Кот А.М. Усиленная люминесценция и неаксиальные моды излучения в активных элементах мощных твердотельных лазеров с поперечной диодной накачкой // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 9. С. 31–36. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-09-31-36
29. Hercher M. An analysis of saturable absorbers // Applied Optics. 1967. V. 6. № 5. P. 947–954. https://doi.org/10.1364/AO.6.000947
30. Demchuk M.I., Kuleshov N.V., Mikhailov V.P. Saturable absorbers based on impurity and defect centers in crystals // IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30. № 9. P. 2120–2126. https://doi.org/10.1109/3.309872
31. Tsunekane M., Taira T. Direct measurement of temporal transmission distribution of a saturable absorber in a passively Q-switched laser // IEEE J. Quantum Electron. 2016. V. 52. № 5. P. 5200107 (1–7). http://doi.org/ 10.1109/JQE.2016.2541922
32. Богданович М.В., Григорьев А.В., Дудиков В.Н., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Татура П.О., Шпак П.В., Тепляшин Л.Л., Болтаев Г.С. Характеристики Nd:YAG-лазера с поперечной диодной накачкой и Cr:YAG пассивным затвором в широком температурном диапазоне // Журнал прикладной спектроскопии. 2023. Т. 90. № 2. С. 143–148. http://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-2-143-148
33. Методы расчета оптических квантовых генераторов: В 4 т. / Под. ред. Б.И. Степанова. Минск: Наука и техника, 1968. Т. 1–4.
34. Богданович М.В., Григорьев А.В., Дудиков В.Н., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Татура П.О., Шпак П.В., Щемелев М.А. Термонаведенное двулучепреломление и модовая селекция в резонаторе Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности // Журнал прикладной спектроскопии. 2022. Т. 89. № 5. С. 621–625. https://doi.org/10.1007/s10812-022-01433-2

Co^{2+}:$MgAl_2O_4$ // J. Am. Ceram. Soc. 2016. V. 99. № 4. P. 1324–1331. https://doi.org/10.1111/jace.14102
24. Ryabtsev G.I., Bezyazychnaya T.V., Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Kabanov V.V., Lebiadok Y.V., Ryabtsev A.G., Shchemelev M.A. Optimized diode-pumped passive Q-switched ytterbium-erbium glass laser // Appl. Phys. B. 2012. V. 108. P. 283–288. http://dx.doi.org/10.1007/s00340-012-5036-3
25. Bogdanovich M.V., Izyneev A.A., Lantsov K.I., Lepchenkov K.V., Ryabtsev A.G., Pavlovskii V.N., Sadovskii P.I., Svitenkov I.E., Shchemelev M.A. Temperature effects on the optical parameters of a passively Q-switched diode-side pumped Yb,Er-laser // Journal of Applied Spectroscopy. 2018. V. 85. № 1. P. 48–54. https://doi.org/10.1007/s10812-018-0610-z
26. Kisel' V.E., Shcherbitskii1 V.G., Kuleshov N.V., Postnova L.I., Levchenko V.I., Galagan B.I., Denker B.I., Sverchkov S.E. Passive Q-switches for a diode-pumped erbium glass laser // Quantum Electronics. 2005. V. 35. № 7. P. 611–614. http://doi.org/ 10.1070/QE2005v035n07ABEH008954
27. Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Lantsov K.I., Lebiadok Y.V., Lepchenkov K.V., Ryabtsev A.G., Ryabtsev G.I., Shchemelev M.A. Amplified luminescence and parasitic laser modes in the active medium of a transverse diode-pumped Nd:YAG laser // Journal of Applied Spectroscopy. 2015. V. 82. № 1. P. 573–577. https://doi.org/10.1007/s10812-015-0147-3
28. Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Ryabtsev A.G., Ryabtsev G.I., Shpak P.V., Shchemelev M.A., Lepchenkov K.V., Lantsov K.I., Dudikov V.N., Kot A.M. Amplified luminescence and nonaxial radiation modes in the active elements of high-power diode side-pumped solid-state lasers // Journal of Optical Technology. 2018. V. 85. № 9. P. 546–550. https://doi.org/10.1364/JOT.85.000546
29. Hercher M. An analysis of saturable absorbers // Applied Optics. 1967. V. 6. № 5. P. 947–954. https://doi.org/10.1364/AO.6.000947
30. Demchuk M.I., Kuleshov N.V., Mikhailov V.P. Saturable absorbers based on impurity and defect centers in crystals // IEEE J. Quantum Electron. 1994. V. 30. № 9. P. 2120–2126. https://doi.org/10.1109/3.309872
31. Tsunekane M., Taira T. Direct measurement of temporal transmission distribution of a saturable absorber in a passively Q-switched laser // IEEE J. Quantum Electron. 2016. V. 52. № 5. P. 5200107 (1–7). http://doi.org/ 10.1109/JQE.2016.2541922
32. Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Dudikov V.N., Ryabtsev A.G., Ryabtsev G.I., Tatura P.O., Shpak P.V., Teplyashin L.L., Boltaev G.S. Characteristics of diode side-pumped Nd:YAG laser with Cr:YAG passive Q-switch within wide temperature range // Journal of Applied Spectroscopy. 2023. V. 90. № 2. P. 246–250. https://doi.org/10.1007/s10812-023-01528-4
33. Metody rastchyeta opticheskikh kvantovykh generatorov: In four volumes / Ed. by B.I. Stepanov. Minsk: Nauka i technika, 1968. V. 1–4.
34. Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Dudikov V.N., Ryabtsev A.G., Ryabtsev G.I., Tatura P.O., Shpak P.V., Shchemelev M.A. Thermally induced birefringence and mode selection in the cavity of a passively Q-switched diode-pumped Nd:YAG laser // Journal of Applied Spectroscopy. 2022. V. 89. № 2. P. 835–838. https://doi.org/10.1007/s10812-022-01433-2

АВТОРЫ

Максим Владимирович Богданович — канд. физ.-мат. наук, директор, Институт физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь; https://orcid.org/0000-0002-1865-8447, m.bogdanovich@ifanbel.bas-net.by

Александр Викторович Григорьев — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь; https://orcid.org/0009-0006-9864-8404, ibebedo@gmail.com

Валерий Николаевич Дудиков — научный сотрудник, Институт физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь; https://orcid.org/0009-0006-0653-3301, dudikov.vn@gmail.com

Андрей Геннадьевич Рябцев — канд. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь; https://orcid.org/0009-0006-5898-4470, ryabtsev@dragon.bas-net.by

Геннадий Иванович Рябцев — доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий Центром "Лазерная физика и технологии", Институт физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь; https://orcid.org/0000-0001-9105-1732, gennadii.ryabtsev@dragon.bas-net.by

Павел Олегович Татура — младший научный сотрудник, Институт физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь; https://orcid.org/0009-0006-0252-0693, pashatatura@gmail.com

Леонид Леонидович Тепляшин — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь; https://orcid.org/0009-0006-3336-3440, teplyashin@imaph.bas-net.by

Павел Валерьевич Шпак — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь; https://orcid.org/0009-0007-9453-7018, p.shpak@dragon.bas-net.by

Максим Анатольевич Щемелев — канд. физ.-мат. наук, зам. заведующего Центром "Лазерная физика и технологии", Институт физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь; https://orcid.org/0009-0007-6603-4237, maksimshch@gmail.com

Статья поступила в редакцию 04.04.2023
Одобрена после рецензирования 13.05.2023
Принята к печати 26.06.2023

AUTHORS

Maxim V. Bogdanovich — PhD in Physics and Mathematics, Director, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Belarus, https://orcid.org/0000-0002-1865-8447, m.bogdanovich@ifanbel.bas-net.by

Alexandr Grigor'ev — PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Belarus, https://orcid.org/0009-0006-9864-8404, ibebedo@gmail.com

Valery Dudikov — Researcher, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Belarus; https://orcid.org/0009-0006-0653-3301, dudikov.vn@gmail.com

Andrew Ryabtsev — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Belarus; https://orcid.org/0009-0006-5898-4470, ryabtsev@dragon.bas-net.by

Gennadii Ryabtsev — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Center "Laser Physics and Technologies", Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Belarus; https://orcid.org/0000-0001-9105-1732, gennadii.ryabtsev@dragon.bas-net.by

Pavel Tatura — Junior Researcher, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Belarus; https://orcid.org/0009-0006-0252-0693, pashatatura@gmail.com

Leonid Teplyashin — PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Belarus; https://orcid.org/0009-0006-3336-3440, teplyashin@imaph.bas-net.by

Pavel Shpak — PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Belarus; https://orcid.org/0009-0007-9453-7018, p.shpak@dragon.bas-net.by

Maxim Shchemelev — PhD in Physics and Mathematics, Deputy Head of the Center "Laser Physics and Technologies", Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Belarus; https://orcid.org/0009-0007-6603-4237, maksimshch@gmail.com

The article was submitted to the editorial office 04.04.2023
Approved after review 13.05.2023
Accepted for publication 26.06.2023