

DOI 10.37539/2949-1991.2026.41.6.015  
УДК 681.7.

**Сизых Вячеслав Алексеевич**, магистрант,  
Новосибирский государственный технический университет  
Sizykh Vyacheslav Alekseevich, Master's student,  
Novosibirsk State Technical University.  
Institute of Automation and Electrometry

**Латкин Никита Иванович**, Аспирант,  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
Latkin Nikita Ivanovich, PhD student,  
Institute of Automation and Electrometry, SB RAS

**Кораблин Павел Дмитриевич**, магистрант,  
Новосибирский государственный технический университет  
Korablin Pavel Dmitrievich, Master's student,  
Novosibirsk State Technical University.  
Institute of Automation and Electrometry

**Яковин Михаил Дмитриевич**,  
кандидат физико-математических наук  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
Yakovin Mikhail Dmitrievich, Cand. Sci. (Phys.-Math.),  
Institute of Automation and Electrometry, SB RAS

**РАЗРАБОТКА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО Nd:YAG ЛАЗЕРА С МОДУЛЯЦИЕЙ  
ДОБРОТНОСТИ И ПРОФИЛЕМ ПУЧКА FLAT-TOP ДЛЯ ЗАДАЧ  
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ СВЕТА  
DEVELOPMENT OF Q-SWITCHED SOLID-STATE Nd:YAG LASER WITH  
A FLAT-TOP BEAM PROFILE FOR OPTICAL PARAMETRIC GENERATION**

**Аннотация.** В статье представлены результаты разработки переносного твердотельного Nd:YAG лазера с модуляцией добротности и выходной энергией импульса до 4.3 мДж. Описана схема резонатора с использованием электрооптического модулятора. Показано, что применение профиля пучка flat-top обеспечивает преимущество при накачке параметрических генераторов света (ПГС). При частоте повторения 2 кГц длительность импульса не превысила 25 нс; данные характеристики делают лазер перспективным переносным источником для аналитического оборудования.

**Abstract.** The paper presents the results of developing a portable solid-state Nd:YAG laser with Q-switching and an output pulse energy of up to 4.3 mJ. An original cavity design is described, featuring compensation for thermally induced depolarization and the use of an electro-optical modulator. It is demonstrated that employing a flat-top beam profile offers a significant advantage when pumping optical parametric generators (OPG). At a pulse repetition rate of 2 kHz, the measured pulse duration was no greater than 25 ns, positioning the laser as a promising portable source for analytical instrumentation.

**Ключевые слова:** Твердотельный лазер, Nd:YAG, модуляция добротности, flat-top, параметрический генератор света.

**Keywords:** Solid-state laser, Nd:YAG, Q-switching, flat-top, optical parametric generator.



### Введение

Импульсные твердотельные лазеры с высокой пиковой мощностью востребованы в задачах прецизионной обработки материалов, лазерной спектроскопии и медицине. Значительная часть серийно выпускаемых источников обладает гауссовым распределением интенсивности в пучке, что приводит к неравномерности абляции и снижению эффективности при использовании в качестве накачки параметрического генератора света (ПГС). Недостаточная энергия на «хвостах» гауссова профиля вызывает лишь нагрев материала, а в схемах ПГС ограничивает КПД преобразования и повышает риск разрушения нелинейных кристаллов [1, 2].

Устранить перечисленные недостатки позволяет применение пучков с равномерным распределением интенсивности (flat-top). Предварительные исследования авторов показали, что использование мощного импульсного лазера с flat-top пучком способнократно повысить эффективность преобразования ПГС по сравнению с гауссовым профилем [3]. На момент проведения исследований на рынке наблюдался дефицит переносных Nd:YAG-лазеров наносекундного диапазона с энергией в импульсе более 2 мДж, пригодных для задач параметрической генерации. Представленные коммерческие образцы, как правило, либо не достигают требуемых энергетических характеристик, либо не оптимизированы для накачки нелинейных кристаллов в составе ПГС.

Целью работы являлось создание переносного образца мощного импульсного Nd:YAG лазера с модуляцией добротности, компенсацией потерь на термооптическую деполяризацию и профилем пучка flat-top для использования в составе аналитического комплекса на основе ПГС.

### Описание конструкции резонатора

Оптическая схема резонатора построена на активном элементе Nd:YAG с поперечной диодной накачкой (Рисунок 1). Выходное зеркало резонатора выполнено с частичным пропусканием на длине волны 1064 нм. Для селекции поляризации применен пленочный поляризатор на диэлектрических пластинах, установленных под углом Брюстера; достигнутая степень поляризации излучения составляет 25:1.

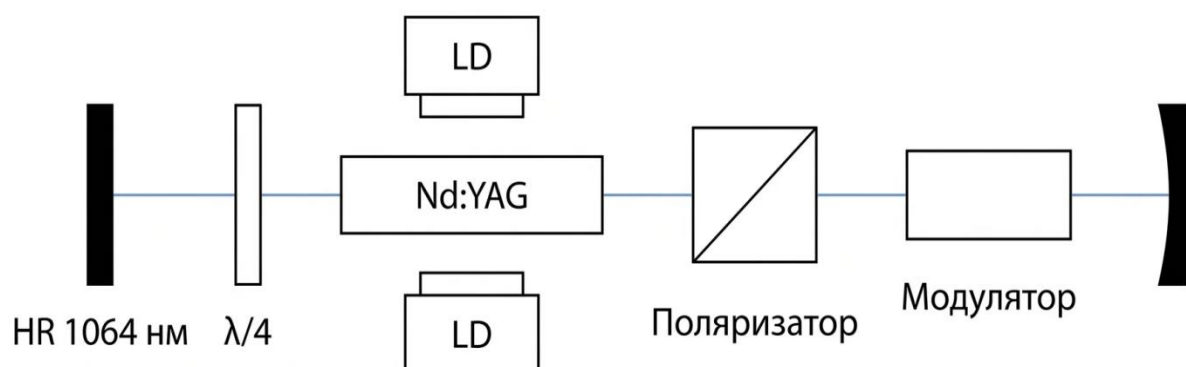


Рисунок 1. Оптическая схема резонатора.

Ключевым элементом управления добротностью является электрооптический модулятор (ЭОМ). При отсутствии управляющего напряжения ЭОМ работает по схеме четвертьволновой пластинки. Падающее линейно-поляризованное излучение приобретает круговую поляризацию, а после отражения от глухого зеркала и повторного прохождения через ЭОМ плоскость поляризации поворачивается на 90°. Это излучение отводится поляризатором из резонатора, обеспечивая накопление инверсии населенности в активной



среде. При подаче напряжения ЭОМ поляризация прошедшего пучка поворачивается на  $90^\circ$  за один проход, добротность резонатора скачкообразно возрастает, и генерируется гигантский импульс.

Для минимизации потерь, вызванных термически наведенным двулучепреломлением в активном кристалле, в резонатор помещена четвертьволновая пластина. Указанный метод компенсации позволяет стабилизировать энергию генерации и улучшить качество пучка при работе в диапазоне частот 1–5 кГц.

#### Экспериментальные результаты

Сборка и юстировка лазера производились с использованием вспомогательного источника видимого диапазона. Положение всех элементов резонатора, активного кристалла, поляризатора, ЭОМ и зеркал последовательно выверялось до получения максимальной выходной мощности в режиме свободной генерации. Затем схема переводилась в режим модуляции добротности. На первом этапе исследовалась конфигурация резонатора с выходным зеркалом, имеющим коэффициент пропускания  $T = 55\%$ . Была измерена зависимость средней выходной мощности от тока накачки при частоте модуляции 2 кГц. Как показано на рисунке 2, в этой конфигурации максимальная выходная мощность составила 6,5 Вт при длительности импульса около 30 нс, а энергия в импульсе достигала не менее 3 мДж (при 2 кГц).

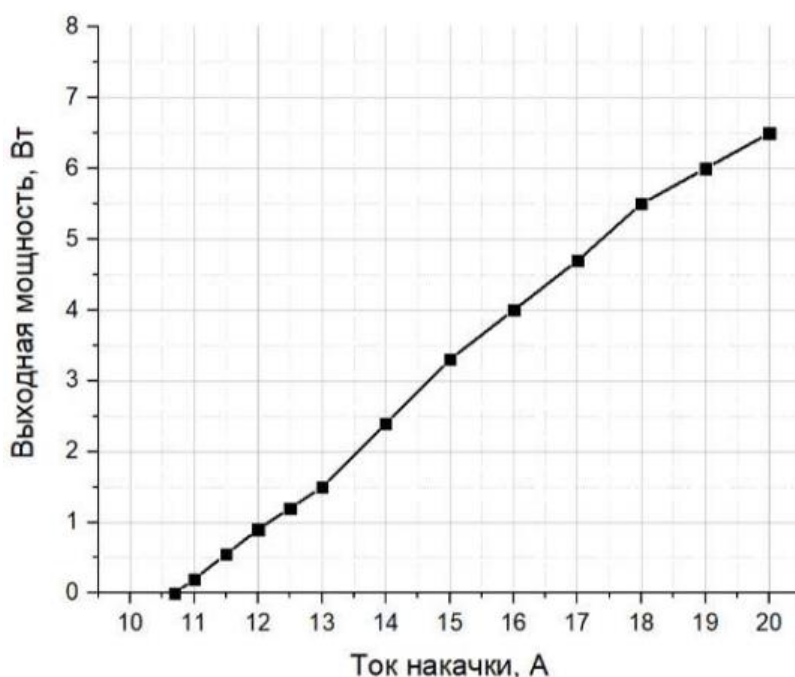


Рисунок 2. Зависимость средней выходной мощности от тока накачки при частоте модуляции 2 кГц (выходное зеркало с  $T = 55\%$ )

Для улучшения энергетических характеристик выходное зеркало было заменено на элемент с меньшим коэффициентом пропускания  $T = 40\%$ . Соответствующая зависимость выходной мощности от тока накачки приведена на рисунке 3. Выбор зеркала с пониженным пропусканием был обусловлен необходимостью увеличить добротность резонатора и обеспечить более полное использование запасённой инверсии населённости. Замена зеркала позволила существенно повысить эффективность генерации: максимальная средняя мощность возросла до 8,6 Вт при токе накачки 20 А, порог генерации составил 10,2 А. Длительность импульса сократилась до 25 нс на полувысоте.



Измерения длительности проводились с помощью осциллографа с временным масштабом 20 нс на деление, при этом перед фотоприёмником устанавливался набор ослабляющих фильтров для предотвращения насыщения.

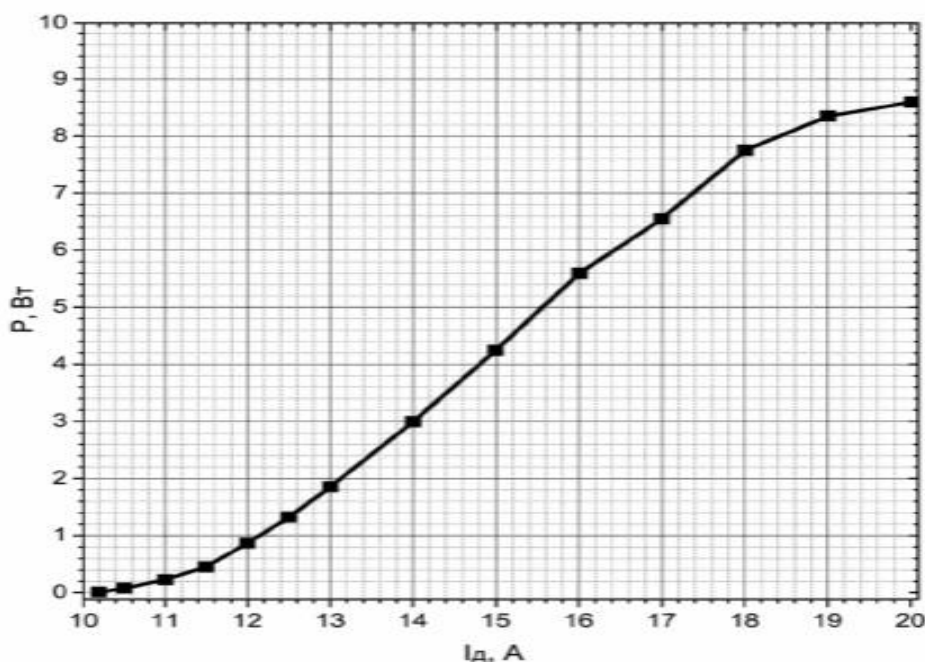


Рисунок 3. Зависимость средней выходной мощности от тока накачки при частоте модуляции 2 кГц (выходное зеркало с  $T = 40\%$ ).

В таблице 1 представлены результаты измерений средней выходной мощности и соответствующие значения энергии в импульсе (рассчитанные по формуле  $E_i = P_{cp}/f_i$ ) в диапазоне частот 1–5 кГц.

Таблица 1

Зависимость характеристик излучения от частоты модуляции

Частота, кГц	Средняя мощность, Вт	Энергия в импульсе, мДж
1	4,3	4,3
2	8,6	4,3
3	10,1	3,37
4	12,0	3,00
5	13,4	2,68

Энергия в импульсе снижается с ростом частоты, что соответствует физике работы лазера в режиме модуляции добротности и связано с сокращением времени накопления инверсии. Максимальная энергия 4,3 мДж зафиксирована на частотах 1–2 кГц.

Профиль распределения интенсивности (Рисунок 4) подтверждает близкую к равномерной (flat-top) форму пучка при выходной мощности 8,6 Вт. Для обеспечения механической стабильности и повторяемости параметров после транспортировки спроектирован и изготовлен жесткий корпус лазера из алюминиевого сплава.



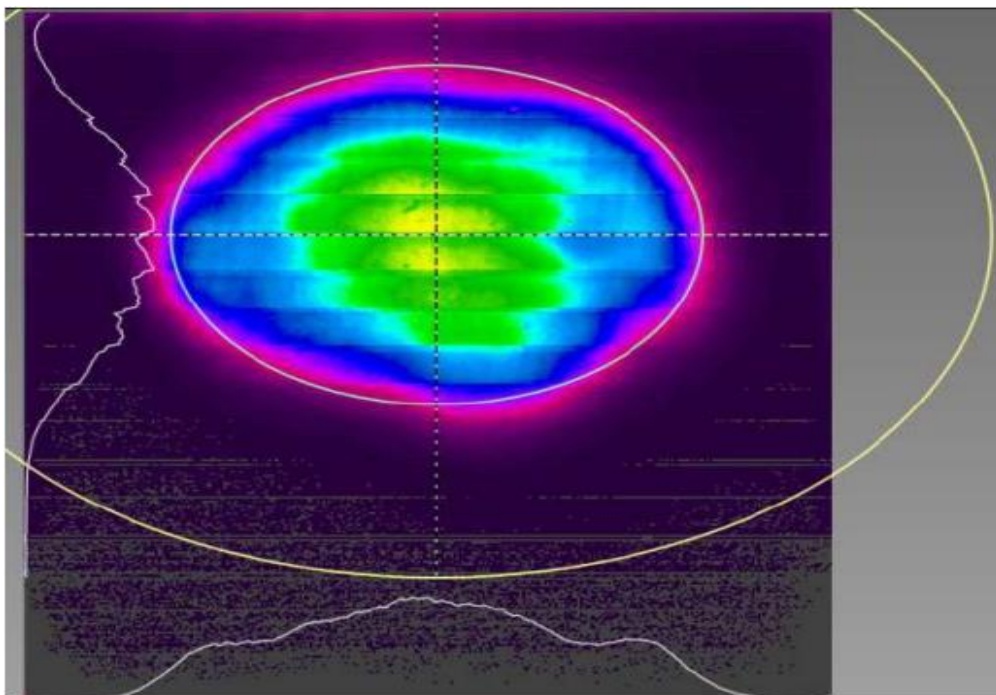


Рисунок 4. Распределение интенсивности при 8.6Вт, 2кГц.

#### Энергетический расчёт для режима модуляции добротности

Для интерпретации экспериментально полученной длительности импульса (25–30 нс) и оценки начальной инверсии населённости в активной среде использована стандартная модель скоростных уравнений для лазера с модуляцией добротности. Данный подход, детально описанный в работах [6] и [7], позволяет связать параметры резонатора, сечение вынужденного излучения и измеренную длительность импульса с отношением начальной инверсии к пороговой.

Исходные данные эксперимента:

- Длина активного элемента Nd:YAG:  $l=63$  мм (легирование 0,5 ат.%).
- Полная концентрация ионов  $Nd^{3+} \approx 6,93 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$
- Длина резонатора:  $L_{air}=185$ мм
- Показатель преломления YAG на 1064 нм:  $n_{YAG} \approx 1,82$
- Пропускание выходного зеркала:  $T=40\%$
- Внутренние оптические потери за обход (оценка):  $\delta_{int} \approx 0,09$
- Энергия в импульсе (при 2 кГц):  $E_{pulse} = 4,3$ мДж
- Экспериментальная длительность импульса:  $\tau_p = 25 - 30$ нс (27,5 средняя)
- Сечение вынужденного излучения Nd:YAG (1064 нм):  $\sigma = 2,8 \times 10^{-19} \text{ см}^2$

Оптическая длина резонатора и время обхода:

$$L' = L_{air} + (n_{YAG} - 1) \cdot l = 185 + (1,82 - 1) \cdot 63 = 185 + 51,66 = 236,66 \text{ мм} \quad (1).$$

$$t_r = \frac{2L'}{c} = \frac{2 \cdot 0,23666}{3 \times 10^8} = 1,578 \text{ нс}. \quad (2).$$

Потери на выходном зеркале:

$$\delta_{out} = -\ln(1 - T) = -\ln(0,60) = 0,5108. \quad (3).$$

Полные потери:

$$\delta_{rt} = \delta_{out} + \delta_{int} = 0,5108 + 0,09 = 0,6008. \quad (4).$$

Пороговая инверсия населённости [6]:



$$n_{th} = \frac{\delta_{rt}}{2\sigma l} = \frac{0,6008}{2 \cdot 2,8 \times 10^{-19} \cdot 6,3} = \frac{0,6008}{35,28 \times 10^{-19}} = 1,70 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}. \quad (5).$$

Пороговая инверсия не зависит от длины резонатора, только от потерь и активной среды.

Определение отношения начальной инверсии к пороговой из длительности импульса. Согласно теории Q-switch [7] и [6]:

$$\tau_p \approx \frac{t_r}{\delta_{rt}} \cdot \frac{r}{r - 1 - \ln r}, \quad r = \frac{n_i}{n_{th}}. \quad (6).$$

Масштаб времени:

$$\frac{t_r}{\delta_{rt}} = \frac{1,578}{0,6008} = 2,626 \text{ нс}. \quad (7).$$

При  $\tau_p = 27,5 \text{ нс}$ :

$$\Phi(r) = \frac{r}{r - 1 - \ln r} = \frac{27,5}{2,626} = 10,47. \quad (8).$$

Таблица 2

Численное решение:

r	r - 1 - ln r	Φ (r)
2,2	1,2 - 0,788 = 0,412	5,34
2,5	1,5 - 0,916 = 0,584	4,28
2,0	1,0 - 0,693 = 0,307	6,51
1,9	0,9 - 0,642 = 0,258	7,36
1,8	0,8 - 0,588 = 0,212	8,49
1,7	0,7 - 0,531 = 0,169	10,06
1,68	0,68 - 0,519 = 0,161	10,43
1,67	0,67 - 0,513 = 0,157	10,64

При  $r=1,68$  получаем  $\Phi \approx 10,43$ , что близко к 10,47. Принимаем  $r=1,68$ .

Начальная инверсия населенности:

$$n_i = r \cdot n_{th} = 1,68 \cdot 1,70 \times 10^{17} = 2,86 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}. \quad (9).$$

Проверка через энергию импульса. Объём активного элемента (диаметр стержня 3 мм = 0,3 см):

$$V_{rod} = \pi \cdot (0,15)^2 \cdot 6,3 \approx 0,445 \text{ см}^3. \quad (10).$$

Энергия кванта на 1064нм:

$$h\nu = \frac{6,626 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{1064 \times 10^{-9}} \approx 1,868 \times 10^{-19} \text{ Дж}. \quad (11).$$

Число фотонов в импульсе:

$$N_{\text{фотонов}} = \frac{4,3 \times 10^{-3}}{1,868 \times 10^{-19}} \approx 2,30 \times 10^{16}. \quad (12).$$

Если допустить, что остаточная инверсия после импульса мала ( $n_{final} \ll n_{th}$ ), то средняя извлечённая плотность инверсии:

$$n_{extr} = \frac{N_{\text{фотонов}}}{V_{rod}} \approx \frac{2,30 \times 10^{16}}{0,445} \approx 5,17 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}. \quad (13).$$

Тогда начальная инверсия должна быть не менее  $n_i \approx n_{extr} + n_{th} \approx 5,17 \times 10^{16} + 1,70 \times 10^{17} = 2,22 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что даёт  $r \approx 1,31$ . Это заниженное значение, так как оно не учитывает, что эффективный объём моды может быть меньше объёма стержня, а также часть



инверсии остаётся после импульса из-за конечной длительности затвора. Расчёт через длительность импульса ( $r \approx 1,68$ ) считается более точным, так как он напрямую использует измеренную длительность и параметры резонатора.

В момент открытия электрооптического затвора инверсия превышает пороговую в 1,68 раза, что обеспечивает стабильную генерацию гигантских импульсов с энергией 4,3 мДж и длительностью 25–30 нс. Полученное значение  $r$  характерно для хорошо оптимизированных твердотельных лазеров с диодной накачкой и подтверждает эффективность выбранной конфигурации резонатора, включая компенсацию деполяризации. Дальнейшее увеличение  $r$  (например, за счёт повышения тока накачки) могло бы сократить длительность импульса, однако это потребовало бы более жёстких требований к оптической прочности внутрирезонаторных элементов. Таким образом, достигнутые параметры являются оптимальными для использования лазера в качестве источника накачки параметрического генератора света.

#### **Заключение**

В результате выполнения работы создан переносной лабораторный образец твердотельного Nd:YAG-лазера с диодной накачкой и электрооптической модуляцией добротности. Модифицирована конструкция резонатора, изготовлены элементы крепежа, юстировочные узлы и жёсткий корпус из алюминиевого сплава, обеспечивающий механическую стабильность и эффективный пассивный отвод тепла.

Экспериментально достигнуты следующие ключевые параметры выходного излучения:

1. Длина волны 1064 нм;
2. Частота повторения импульсов 1-5 кГц;
3. Максимальная энергия в импульсе 4,3 мДж;
4. Степень поляризации 1:25;
5. Профиль пучка Top-Nat.

Проведённые испытания подтвердили повторяемость параметров излучения после транспортировки лазера в сходные температурные условия. Разработанный лазер может быть использован как переносной источник накачки для ПГС в составе аналитических приборов для мониторинга атмосферы, неинвазивной медицинской диагностики, а также как самостоятельный инструмент для научных исследований в области взаимодействия лазерного излучения с веществом, нелинейной оптики и прецизионной обработки материалов.

#### *Список литературы:*

1. Donin V.I., Yakovin D.V., Yakovin M.D., Griбанov A.V. Superluminescent high-efficient parametric generation in PPLN crystal with pumping by a Q-switched mode locked Nd:YAG laser // Laser Phys. Lett. – 2018. – Vol. 15. – 035005.
2. Ishizuki H., Taira T. Half-joule output optical-parametric oscillation by using 10-mm-thick periodically poled Mg-doped congruent LiNbO<sub>3</sub> // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20. – P. 20002–20010.
3. Ерушин Е.Ю., Яковин М.Д., Латкин Н.И., Подзывалов С.Н., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А. Перестраиваемый параметрический генератор света на основе кристаллов MgO:PPLN и HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> с накачкой Nd:YAG-лазером с повышенными энергетическими характеристиками // Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53, № 9. – С. 712–719.
4. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Карапузиков А.И. и др. Перестраиваемый в широком спектральном интервале источник лазерного излучения среднего ИК диапазона для оптико-акустической спектроскопии // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49, № 1. – С. 29–34.



5. Clarkson W.A., Felgate N.S., Hanna D.C. Simple method for reducing the depolarization loss resulting from thermally induced birefringence in solid-state lasers // Opt. Lett. – 1999. – Vol. 24, № 15. – P. 820.
6. Koechner W. Solid-State Laser Engineering. – 8th ed. – Springer, 2013. – 756 p.
7. Paschotta R. Encyclopedia of Laser Physics and Technology. – Wiley-VCH, 2008. – 844 p.

