

**Перестроечные генерационные характеристики Nd:YVO<sub>4</sub> лазера с продольной накачкой**Ю. А. Синичкина<sup>1,\*</sup>, М. В. Горбунков<sup>2</sup>, Ю. Я. Маслова<sup>2,†</sup>, М. А. Семенов<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, факультет «Фундаментальные науки», кафедра «Техническая физика»

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

<sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

Россия, Москва 119991, Ленинский пр-т, д. 53

(Поступила в редакцию 06.06.2024; подписана в печать 13.06.2024)

Разработана методика отбора лазерных сред для генерации коротких импульсов по механизму форсированного режима керровской линзы с мягкой диафрагмой. Она основана на измерениях перестроечных генерационных характеристик твердотельного лазера с плоско-сферическим резонатором и узкой, по сравнению с размером основной моды пустого резонатора, продольной накачкой. Предложена схема, в которой активный элемент установлен на плоском зеркале. Методика на примере Nd:YVO<sub>4</sub>-лазера позволила провести отнесение найденных конфигураций резонатора к соответствующим несократимым дробям, определяющих условия вырождения 1/6, 1/4, 1/2, 1/5, 1/3, 3/8, 2/7. Получена зависимость пороговой мощности от длины резонатора в условиях непрерывной накачки и с прерывателем пучка со скажностью 100 на всей длине резонатора и вблизи полуконфокальной конфигурации, а также выходной мощности вблизи указанной конфигурации. Измерение порога генерации с продольным пространственным разрешением 0.05 мм оказалось достаточным, чтобы определить границы области длин резонатора, соответствующей устойчивой генерации коротких импульсов.

PACS: 42.60.Da, 42.55.Px, 42.55.Rz

УДК: 535.015

Ключевые слова: твердотельный лазер, продольная накачка, порог генерации, критические конфигурации, вырожденный резонатор.

**ВВЕДЕНИЕ**

Фемтосекундные лазеры получили широкое применение в промышленной обработке материалов, биологии и медицине: стоматологии, офтальмологии и нейрохирургии. Сверхкороткая длительность импульса позволяет существенно уменьшить зону термического влияния и улучшить качество лазерной обработки. Конструкция многих фемтосекундных лазеров включает нелинейное зеркало — SESAM (SEmiconductor Saturable Absorber Mirror), которое служит для осуществления пассивной самосинхронизации мод. Помимо SESAM, альтернативным методом самосинхронизации мод является использование изменения показателя преломления в поле световой волны по механизму керровской линзы. Различают два подхода. Во-первых, это режим жесткой диафрагмы, когда в резонатор лазера устанавливается реальная диафрагма, частично ограничивающая прохождение лазерного пучка [1]. При этом часть излучения с более высокой мощностью проходит диафрагму с меньшими потерями. Это приводит к обострению временного хода импульса, аналогичному возникающему при прохождении безынерционного насыщающегося поглотителя. Во-вторых, это так называемый режим керровской линзы с мягкой диафрагмой. В этом случае керровская линза приводит к большей эффективности снятия инверсии в активном элементе [2].

Форсированный режим керровской линзы [3, 4] с мягкой диафрагмой возникает вблизи так называемых критических конфигураций резонатора, ряда областей вблизи вырожденных длин резонатора. Они реализуются в условиях продольной накачки [5–8], достаточно узкой по сравнению с размером моды пустого резонатора. Отличительной чертой критической конфигурации является аномальный ход перестроечных характеристик — зависимостей порога генерации и выходной мощности лазера от длины резонатора [9–11].

В работе [12], посвященной режиму керровской линзы с мягкой диафрагмой, приводится экспериментальная методика поиска длины резонатора для самосинхронизации мод по особенностям выходной мощности четырехзеркального лазера. Для теоретического обоснования метода необходимо отнесение найденных конфигураций к условию вырождения, что удобно делать по пороговым зависимостям. Отметим, что кривые пороговых зависимостей напрямую указывают значение длины резонатора, допускающие форсированный режим с мягкой керровской линзой, что имеет значение для практики. Для генерации ультракоротких импульсов на основе механизма керровской линзы с мягкой диафрагмой необходимо в первую очередь исследовать кристаллы, у которых ход зависимости пороговой и выходной мощности от длины резонатора свидетельствует о возможности реализовать максимальную добавку эффективности снятия инверсии в активном элементе. На развитие самосинхронизации мод влияет также возникновение под действием накачки тепловой линзы и различных возмущений волнового фронта. Цель настоящей работы — разработка оптимальной методи-

\* sinichkina\_y@mail.ru

† jmaslova@mail.ru

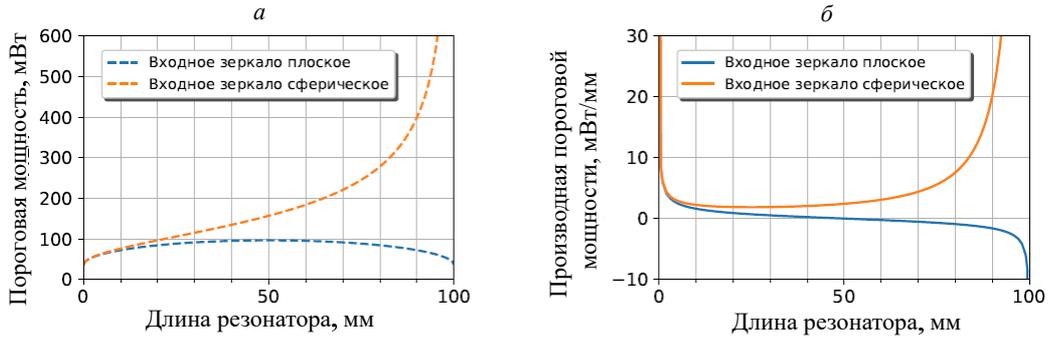


Рис. 1. Зависимости (а) пороговой мощности и (б) производных пороговой мощности от длины резонатора для расположения кристалла у плоского и сферического зеркал

ки измерения перестроочных характеристик, достаточных для начала выбора подходящей активной среды. Альтернативным способом является регистрация поперечного распределения интенсивности на выходе лазера, но этот способ является трудоемким и поэтому он не был использован в настоящей работе.

## 1. ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

### 1.1. Пороговая мощность генерации лазера с продольной накачкой вне критических конфигураций

Порог генерации — это минимальная мощность накачки, при которой начинается лазерная генерация. В работе [13] получена формула для пороговой мощности накачки в предположении, что генерация осуществляется на основной моде пустого резонатора, а накачка производится гауссовым пучком:

$$P_{th} = \frac{\pi h \nu_p (w_l^2 + w_p^2)}{4\sigma f_2 \tau (1 - e^{-\alpha l})} (L + T + 2N_1^0 \sigma l), \quad (1)$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $\nu_p$  — частота излучения накачки,  $\sigma$  — сечение вынужденного излучения,  $\tau$  — время жизни верхнего лазерного уровня,  $f_2$  — относительная заселенность нижнего лазерного уровня,  $\alpha$  — коэффициент поглощения накачки,  $l$  — длина кристалла,  $w_l$  — радиус нулевой моды пустого резонатора,  $w_p$  — радиус пучка накачки,  $L$  — пассивные потери в резонаторе,  $T$  — коэффициент пропускания выходного зеркала резонатора,  $N_1^0$  — равновесная плотность заселенности нижнего лазерного уровня.

Для измерения пороговой мощности существует две геометрии: когда активный элемент находится вблизи плоского зеркала и когда он расположен вблизи сферического зеркала. Для выбора конкретной геометрии были рассчитаны зависимости размера нулевой моды  $w_l$  двухзеркального резонатора от его длины в этих двух случаях.

### 1.2. Зависимость нулевой моды плоско-сферического резонатора от его длины

Рассмотрим плоско-сферический резонатор. Для расчета радиусов нулевой моды на плоском  $w_{0l_p}$  и сферическом зеркале  $w_{0l_s}$  были использованы следующие выражения, полученные с помощью методов матричной оптики [14]:

$$w_{0l_p} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{L(R-L)}}, \quad (2)$$

$$w_{0l_s} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} R \sqrt{\frac{L}{(R-L)}}}, \quad (3)$$

где  $L$  — длина резонатора,  $R$  — радиус кривизны сферического зеркала.

Ширина области устойчивости резонатора равна радиусу кривизны зеркала  $R$ . Радиус моды на сферическом зеркале монотонно возрастает и всегда больше радиуса на плоском зеркале. Радиус моды на плоском зеркале имеет максимум в центре области устойчивости резонатора при  $L = R/2$ , а зависимость от длины резонатора имеет зеркально-симметричный вид. С уменьшением радиуса кривизны зеркала радиус моды для каждой из геометрий уменьшается пропорционально корню из радиуса.

Общий вид пороговой мощности, рассчитанной по формуле (1), повторяет ход радиуса пучка основной моды. На рис. 1, а представлены функции пороговой мощности от длины резонатора для двух случаев: с входным плоским и с входным сферическим зеркалом для набора параметров:  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  Дж·с,  $\lambda = 808$  нм,  $\sigma = 114 \times 10^{-24}$  м<sup>2</sup>,  $\tau = 90$  мкс,  $f_2 = 0.4$ ,  $\alpha = 0$ ,  $w_p = 100$  мкм,  $L + T = 10\%$ ,  $N_1^0 = 0$ .

Приведенные на рис. 1, б графики позволяют сделать вывод о том, что с входным сферическим зеркалом значение производной всегда больше, чем с входным плоским зеркалом.

Таблица. Характеристики шагового двигателя NEMA11.

Параметр	Значение
Тип двигателя	Двухфазный биполярный
Смещение транслятора за один оборот двигателя	1 мм
Количество шагов на оборот	200
Точность повторного позиционирования	0,02–0,03 мм
Максимальная скорость	80 мм/с
Диапазон перемещения транслятора	200 мм

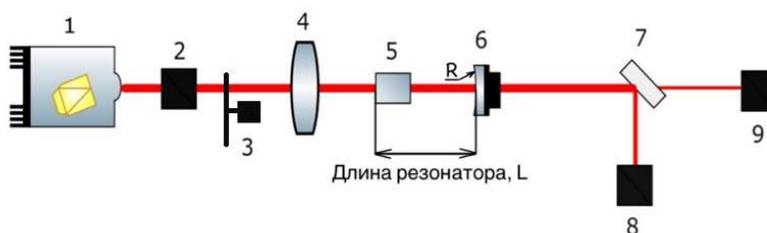


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — титан-сапфировый лазер, 2 — ослабитель, 3 — прерыватель пучка, 4 — сферическая линза, 5 — активный элемент, 6 — сферическое зеркало,  $R = 100$  мм, 7 — светоделительная пластина, 8 — спектрометр/цифровая CMOS-камера, 9 — измеритель мощности.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОРОГОВОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ОТ ДЛИНЫ ПЛОСКО-СФЕРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

### 2.1. Экспериментальная установка

Для экспериментального исследования зависимостей порога генерации от длины резонатора лазера была собрана установка, схема которой представлена на рис. 2. В качестве источника накачки был использован перестраиваемый титан-сапфировый лазер TiF-DP KIT 1 производства фирмы ООО «Авеста». Перестройка длины волны осуществлялась с помощью внутрирезонаторного фильтра Лию. В данном эксперименте использовалось излучение с длиной волны 808 нм, что соответствовало максимуму поглощения кристалла, ширина спектра — 0,35 нм. Излучение накачки фокусировалось в активную среду при помощи сферической линзы 4 с фокусным расстоянием  $F = 100$  мм. Радиус пучка накачки в фокусе линзы составлял 42 мкм. Линза была установлена на транслятор с микрометрическими винтами, при помощи которых изменялось положение линзы в поперечном направлении относительно оси резонатора.

Резонатор лазера был создан на основе плоского и сферического зеркала. Плоское зеркало было напылено на входную грань активного элемента 5 на основе кристалла Nd:YVO<sub>4</sub> толщиной 0,5 мм. Юстируемая оправа со сферическим зеркалом 6 была установлена на линейный транслятор с ходом 200 мм, что позволяло изменять длину резонатора. Начало генерации в экспериментах по исследованию пороговой мощно-

сти определялось по цифровому спектрометру ASP-150T или по цифровой камере CMOS-1,3M/10U 8. Мощность накачки регулировалась грубо током накачки титан-сапфирового лазера. Тонкая регулировка мощности осуществлялась с помощью моторизованного ослабителя OAGP-6-S-850 2, который обеспечивал шаг 0,1% по коэффициенту пропускания. Также для ряда экспериментов был использован механический прерыватель пучка 3 со скважностью 100. Цифровой измеритель мощности Coherent FieldMaxII-T0 с головкой OP-2VIS 9 (чувствителен в диапазоне 30 мВт) позволял регистрировать выходную мощность исследуемого лазера напрямую.

Для автоматизации эксперимента было разработано программное обеспечение для управления установкой и сбора данных. Для перемещения платформы транслятора использовался шаговый двигатель NEMA11, характеристики которого представлены в таблице.

### 2.2. Экспериментальные результаты

Перестроечные генерационные характеристики лазера на кристалле Nd:YVO<sub>4</sub> были исследованы как в условиях непрерывной накачки, так и с использованием механического прерывателя пучка для снижения влияния термических эффектов. Экспериментально полученные зависимости пороговой мощности генерации в области устойчивости резонатора представлены на рис. 3, а. В отличие от предыдущих работ, наиболее ярко эффекты синхронизации нескольких поперечных мод проявляются не только при  $L = 1/4R$ ,

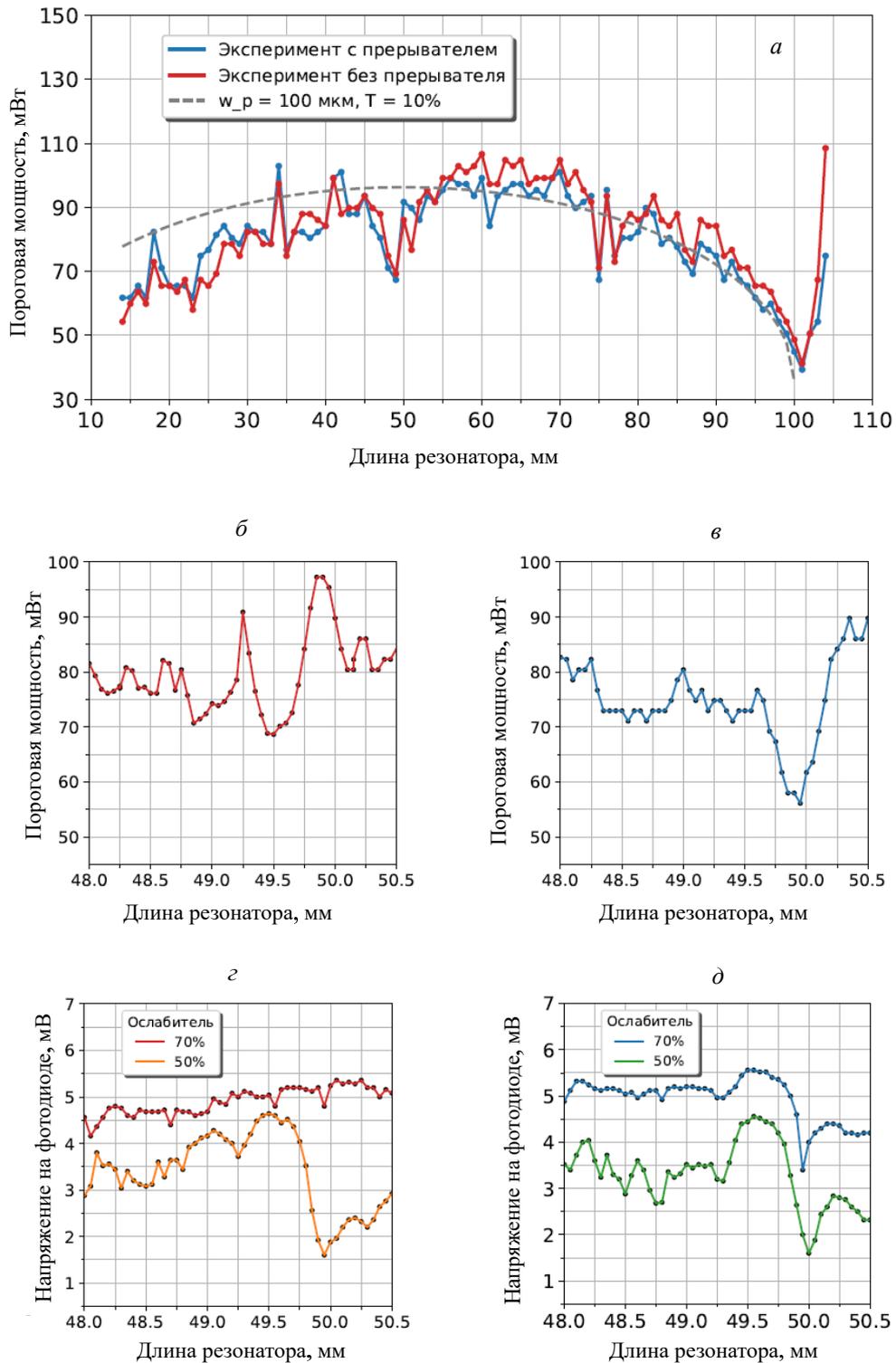


Рис. 3. Зависимость пороговой мощности  $P_{th}$  от длины резонатора  $L$  в условиях непрерывной накачки (а, б) и с прерывателем пучка со скважностью 100 (а, в) на всей длине резонатора (а) и вблизи критической конфигурации  $L = 0.5R$  (б, в), а также выходной мощности вблизи указанной конфигурации в тех же условиях (г, д)

$1/2R$ ,  $3/4R$ , но и при  $L = 1/3R$ ,  $3/5R$ ,  $0.87R$ . Методика позволила провести отнесение найденных конфигураций резонатора к соответствующим несократимым

дробям, определяющих условия вырождения  $1/6$ ,  $1/4$ ,  $1/2$ ,  $1/5$ ,  $1/3$ ,  $3/8$ ,  $2/7$ .

В целом экспериментальная зависимость качественно повторяет теоретическую (рис. 3, а). Ввиду симметрии относительно вырожденной длины резонатора генерационные характеристики вблизи полуконфокальной конфигурации являются выделенными и изменялись с повышенным разрешением.

Стоит отметить, что не наблюдается ожидаемое симметричное расположение критических конфигураций на длине резонатора 25 и 75 мм. Автоматизация эксперимента позволила увеличить продольное пространственное разрешение (уменьшить шаг сканирования) при измерении выходной и пороговой мощности генерации, а также сократить время эксперимента. Измерение порога генерации с продольным пространственным разрешением 0.05 мм оказалось достаточным, чтобы оценить применимость лазерного кристалла для генерации фемтосекундных импульсов.

Эксперименты, выполненные с пространственным разрешением 0.05 мм в условиях уменьшенной тепловой нагрузки, позволили выделить диапазон длин резонатора, пригодный для генерации коротких импульсов по механизму форсированного режима керровской линзы с мягкой диафрагмой. Экспериментально зарегистрировано заметное смещение минимума пороговой мощности относительно минимума выходной мощности для кристалла Nd:YVO<sub>4</sub> при длине резонатора вблизи  $L = 50$  мм.

В условиях непрерывной накачки (полной тепловой нагрузки) обнаружен нетривиальный ход пороговой мощности при изменении длины резонатора. Тем не менее, ход кривой показывает, что в этом случае форсированный режим керровской линзы возможен. При измерении выходной мощности перестроечные характеристики не столь информативны. Если в условиях уменьшенной тепловой нагрузки диапазон длин резонатора, пригодный для генерации коротких импульсов, отмечен крутым падением выходной мощности, то переход к непрерывной накачке нарушает такую возможность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика отбора лазерных сред для генерации коротких импульсов по механизму форсированного режима керровской линзы с мягкой диафрагмой, основанная на измерениях перестроечных генерационных характеристик твердотельного лазера с плоском-сферическим резонатором и продольной накачкой.

Выбрана оптическая схема, в которой активный элемент установлен на плоском зеркале. Изменение длины резонатора в этом случае не приводит к значительному изменению площади моды в активном элементе. Соответственно ограничивается рост пороговой мощности вне критических конфигураций и устраняется деформация контура провала вблизи большинства вырожденных длин резонатора. Методика позволила провести отнесение найденных конфигураций резонатора к соответствующим несократимым дробям, определяющих условия вырождения  $1/6, 1/4, 1/2, 1/5, 1/3, 3/8, 2/7$ . Измерение порога генерации с продольным пространственным разрешением 0.05 мм оказалось достаточным, чтобы оценить применимость лазерного кристалла для генерации фемтосекундных импульсов.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность научному сотруднику ФИАН канд. физ.-мат. наук С. А. Амброзевичу, заведующему лабораторией фотоники молекул ФИАН канд. физ.-мат. наук В. А. Петухову и профессору физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова доктору физ.-мат. наук В. Г. Тункину за помощь в подготовке эксперимента.

- 
- [1] Звелто О. // Принципы лазеров. Мир, 1990.
- [2] Kimura S., Tani S., Kobayashi Y. // Phys. Rev. A. **102**, N 4. 043505. (2020).
- [3] Lin J.H., Wei M.D., Hsieh W.F., Wu H.H. // JOSA B. **18**, N 8. 1069 (2001).
- [4] George J., Thakur P., Bindra K.S., Oak S.M. // Appl. Opt.. **53**, N 32. 7749 (2014).
- [5] Sanches F., Brunel M., Ait-Ameur K. // J. of the Opt. Soc. of Am. B. **15**, N 9. 2390 (1998).
- [6] Zhang X., Zhao S., Wang Q., Ozygus B., Weber H. // IEEE J. of Quantum Electronics. **35**, N 12. 1912 (1999).
- [7] Горбунков М.В., Кострюков П.В., Телегин Л.С. и др. // Квантовая электроника. **37**, N 2. 173 (2007).
- [8] Горбунков М.В., Кострюков П.В., Тункин В.Г. // Квантовая электроника. **38**, N 7. 689 (2008).
- [9] Wu H.-H., Sheu C.-C., Chen T.-W., Wei M.-D., Hsieh W.-F. // Opt. Commun. **165**. 225 (1999).
- [10] Zhang O., Ozygus B., Weber H. // EPJ Appl. Phys. **6**. 293 (1999).
- [11] Безотосный В.В., Горбунков М.В., Кострюков П.В. и др. // Краткие сообщения по физике. **40**, N 3. 3 (2013).
- [12] Salin F., Squier J., Piche M. // Opt. Lett. **16**, N 21. 1674 (1991).
- [13] Risk W. P., Lenth W. // Opt. Lett. **12**, N 12. 993 (1987).
- [14] Джерард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику / пер. с англ. А.И. Божкова и Д.В. Власова; под ред. В.В. Коробкина. М.: Мир, 1978. 342 с.

## Tuning lasing characteristics of a longitudinally pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser

Y. A. Sinichkina<sup>1,a</sup>, M. V. Gorbunkov<sup>2</sup>, Y. Y. Maslova<sup>2,b</sup>, M. V. Semenov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Bauman Moscow State Technical University, Department of Technical Physics, Faculty of Fundamental Sciences  
Moscow 105005, Russia*

<sup>2</sup>*Lebedev Physical Institute RAS, Moscow 119991, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>sinichkina\_y@mail.ru, <sup>b</sup>jmaslova@mail.ru*

A method for selecting laser media for generation of short laser pulses using the forced Kerr lens with a soft aperture has been developed. It is based on measurements of the tuning lasing characteristics of a solid-state laser with a plane-spherical resonator and a narrow longitudinal pump beam as compared to the size of the fundamental mode of an empty resonator. A scheme is proposed in which the active element is mounted close to a flat mirror. The technique based on the example of the Nd:YVO<sub>4</sub> laser made it possible to assign the found resonator configurations to the corresponding irreducible fractions determining the degeneracy conditions 1/6, 1/4, 1/2, 1/5, 1/3, 3/8, 2/7. The dependence of the threshold power on the length of the resonator is obtained under conditions of continuous pumping and with optical shutter with a duty factor 100 over the resonator stability region and near the semi-focal configuration, as well as the output power near the specified configuration. The measurement of the generation threshold with a longitudinal spatial resolution of 0.05 mm was sufficient to determine the boundaries of the region corresponding to the stable generation of short pulses.

PACS: 42.60.Da, 42.55.Px, 42.55.Rz.

*Keywords:* solid-state laser, longitudinal pumping, lasing threshold, critical configurations, degenerate laser cavity.  
*Received 6 June 2024.*

### Сведения об авторах

1. Синичкина Юлия Александровна — студент; e-mail: sinichkina\_y@mail.ru.
2. Горбунков Михаил Валериевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (499) 132-61-29, e-mail: gorbunkovmv@lebedev.ru.
3. Маслова Юлия Ярославовна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: jmaslova@mail.ru.
4. Семенов Михаил Алексеевич — науч. сотрудник; тел.: (499) 132-68-74, e-mail: semenovma@lebedev.ru.