

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$ ЛАЗЕРА С ПОВЫШЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Т.В. Чобан

chobantv@yandex.ru

SPIN-код: 1867-4032

А.А. Жирнов

zhirnovrl@gmail.com

SPIN-код: 9472-8399

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

На сегодняшний день в различных областях науки и техники широкое применение находят приборы, важным функциональным узлом которых является лазер, излучающий в области 1,5 мкм и обладающий высокой стабильностью генерируемой длины волны. В работе исследована возможность создания отвечающего этим требованиям источника излучения — твердотельного лазера на $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ -фосфатном стекле: предложена конструкция лазера, исследованы причины возникновения флуктуаций частоты в такой схеме, а также предложены схемы экспериментальных установок для определения характера зависимости флуктуаций частоты излучения от колебаний компонентов резонатора.

Ключевые слова

Твердотельный лазер, резонатор, флуктуации частоты, спектр, стабильность длины волны, моделирование, интерферометр Фабри – Перо, степени свободы, вибрации, чувствительность

Поступила в редакцию 14.05.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Узкополосные лазерные источники, излучающие в области 1,5 мкм, находят широкое применение в приборах волоконно-оптической телекоммуникации и высокоточных метрологических измерений, волоконных сенсорах, медицинском оборудовании и др. Эффективность и качество работы таких приборов определяются характеристиками использованного в них лазерного источника, к которому предъявляются строгие требования [1]. К таким требованиям относятся узкая ширина полосы (до 100 кГц), низкий уровень шума мощности генерируемого излучения ($RIN < -140$ дБ/Гц), возможность обеспечения перестройки выходной длины волны, а также особо значимое требование — высокая стабильность частоты генерируемого излучения. Рядом важных преимуществ по сравнению с другими типами лазеров, излучающих в области 1,5 мкм, обладает твердотельный лазер на основе легированного ионами $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ -фосфатного стекла [2–6]. Лазер такого типа представляет интерес, поскольку имеет высокий потенциал возможности обеспечения указанных выше требований при использовании доступной элементной базы и простоте сборки и юстировки конструкции, что определяет относительно невысокую стоимость такого источника и, соответственно, готового прибора, в котором лазер будет приме-

няться. Таким образом, можно сформулировать цель исследования как создание лазера на основе $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ -фосфатного стекла, обладающего высокой стабильностью генерируемой частоты.

Особенности схемы твердотельного $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ -лазера. Схема исследуемого лазера приведена на рис. 1. Активная среда 1 из фосфатного стекла толщиной 1 мм, легированного ионами Er^{3+} и Yb^{3+} , и зеркало 2 с кривизной $\text{ROC} = 50$ мм формируют резонатор: на первую поверхность активной среды нанесено покрытие, отражающее генерируемое излучение и пропускающее накачку с коэффициентами соответственно $R_{1@1550\text{ нм}} > 99,9\%$, $R_{1@976\text{ нм}} < 2\%$, вторая поверхность активной среды пропускает генерируемое излучение и отражает накачку с соответствующими коэффициентами $R_{2@1550\text{ нм}} < 0,02\%$, $R_{2@976\text{ нм}} > 80\%$, выходное зеркало пропускает 0,5 % генерируемого излучения ($R_{3@1550\text{ нм}} = 99,5\%$) [7]. Накачка осуществляется лазерным диодом, излучающим на длине волны 976 нм [1, 4]. Излучение генерируется в диапазоне 1530...1570 нм в зависимости от интенсивности накачки и конфигурации резонатора.

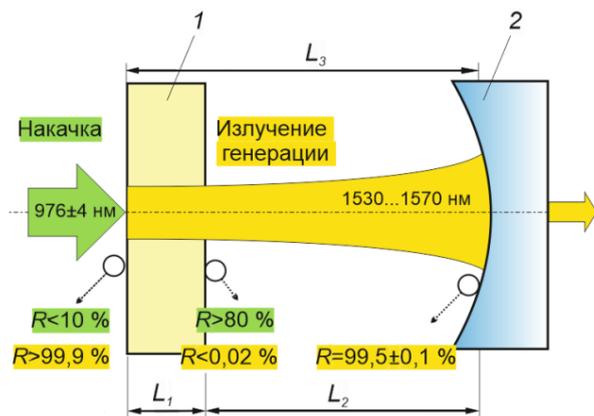


Рис. 1. Схема исследуемого лазера

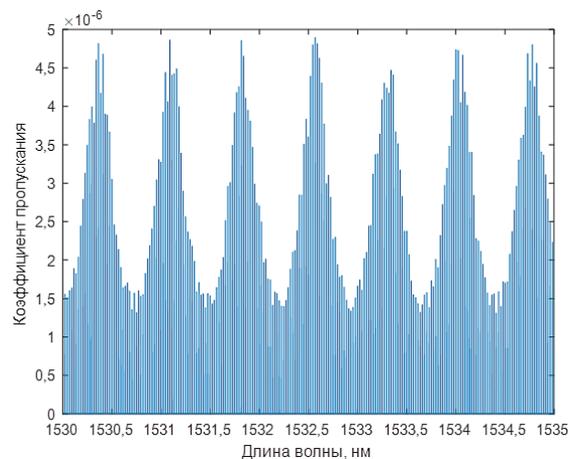


Рис. 2. Теоретический вид спектра пропускания резонатора

Исследование флуктуаций частоты генерации. При рассмотрении характера флуктуаций частоты генерации твердотельного лазера можно подразделить их на две группы [6]:

1) долговременные флуктуации, имеющие место в масштабе времени около и более 1 с и обусловленные изменением длины L или показателя преломления воздуха n_v промежутка между компонентами под воздействием давления окружающего воздуха, температурными эффектами в активном элементе, изменяющими длину резонатора;

2) кратковременные флуктуации, обусловленные акустическими и вибрационными воздействиями, приводящими к колебаниям зеркал, и, как следствие, к изменению длины резонатора L , а также волнами звукового давления, модулирующими показатель преломления n_v .

В исследуемом лазере имеют место как долговременные, так и кратковременные флуктуации излучаемой частоты. Для уменьшения долговременных флуктуаций необходимо поместить лазер в камеру, обеспечивающую стабильное давление, а также стабилизировать температуру активного элемента, обеспечив отвод теплоты [6]. Эта задача будет решена при изготовлении для лазерного источника корпусной конструкции, дающей возможность его серийного выпуска и применения. На данном этапе исследования основными задачами являются выделение и исследование кратковременной составляющей нестабильности частоты, вызванной колебаниями компонентов лазера в лабораторной установке.

Было установлено, что основная причина, вызывающая частотные флуктуации для данной схемы лазера, заключается в подверженности компонентов резонатора внешним вибрационным воздействиям при сборке лабораторной установки на юстировочных элементах, имеющих большое число степеней свободы [5, 6]. Возникновение этих флуктуаций можно объяснить, рассмотрев спектр пропускания лазерного резонатора, для чего необходимо представить схему лазера (см. рис. 1) как совокупность трех интерферометров Фабри — Перо, спектр пропускания каждого из которых определяется известной формулой

$$T(\lambda) = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{\left(1 - \sqrt{R_1 R_2}\right)^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)}, \quad (1)$$

где R_1, R_2 — коэффициенты отражения покрытий компонентов, поверхности которых составляют каждый интерферометр длиной L .

Первый интерферометр сформирован двумя поверхностями активной среды и в формуле (1) для него $R_1 = R_{1@1550 \text{ нм}}$, $R_2 = R_{2@1550 \text{ нм}}$, $L = L_1 n_{AC}$ ($L_1 = 1$ мм — толщина активной среды; n_{AC} — показатель преломления материала активной среды, который считаем постоянным, так как температурная стабильность активной среды обеспечена корпусной конструкцией лазера). Второй интерферометр формируется второй поверхностью активной среды и выходным зеркалом,

$R_1 = R_{2@1550 \text{ нм}}$, $R_2 = R_{3@1550 \text{ нм}}$, $L = L_2 = \text{ROC} = 50 \text{ мм}$ (для случая корпусной конструкции лазерного источника показатель преломления воздуха между компонентами резонатора также можно считать постоянным, $n_b = 1$). Третий интерферометр сформирован первой поверхностью активной среды и выходным зеркалом, $R_1 = R_{1@1550 \text{ нм}}$, $R_2 = R_{3@1550 \text{ нм}}$, $L = L_3 = L_1 n_{AC} + L_2$. Случайные изменения длин интерферометров изменяют спектр пропускания каждого из них $T_k(\lambda)$, $k = 1, 2, 3$, и, как следствие, спектр пропускания всего резонатора в целом $T_0(\lambda)$, определяемый как

$$T_0(\lambda) = T_1(\lambda)T_2(\lambda)T_3(\lambda). \quad (2)$$

Вид этого спектра рассчитан по формуле (2) и представлен на рис. 2.

Путем моделирования спектра пропускания в зависимости от изменения длины резонатора ΔL , которое может возникать при колебаниях компонентов установки, было получено, что зависимость сдвига (рис. 3) пика пропускания резонатора в спектре от смещения компонента резонатора вдоль оптической оси может быть приближена графиком линейной зависимости с коэффициентом $\Delta\lambda/\Delta L = S \cong 3 \cdot 10^{-5}$, который можно понимать как чувствительность генерируемой длины волны к колебаниям компонентов резонатора (рис. 4).

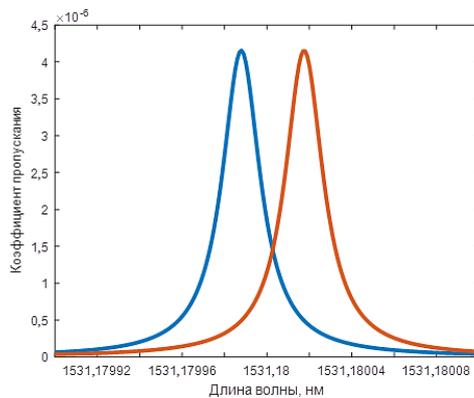


Рис. 3. Сдвиг излучаемой длины волны при смещении компонента на 1 нм

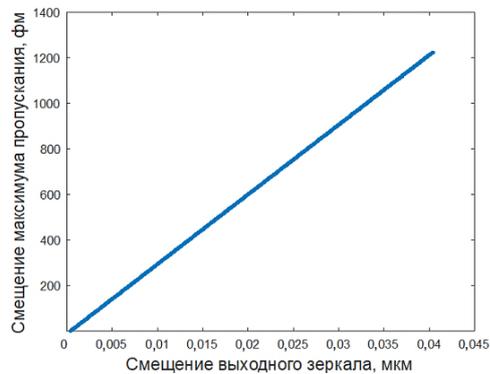


Рис. 4. Зависимость сдвига пика пропускания резонатора в спектре от смещения компонента резонатора вдоль оптической оси

Измерение флуктуаций частоты генерации. Для измерения нестабильности частоты были собраны экспериментальные установки, схемы которых представлены на рис. 4 и 5. В схеме, показанной на рис. 4, излучение генерации анализировалось на измерителе длины волны WS-U ООО «Ангстрем», одновременно колебания выходного зеркала, обусловленные в этом случае постоянно присутствующими вибрациями оправ юстировочных элементов, оптического стола и др., фиксировались измерителем вибрации на основе интерферометра Майкельсона с примени-

ем обработки методом нелинейной регрессии [8]. Данная установка чувствительна к колебаниям компонентов до долей нанометра и обеспечивает погрешность измерения нестабильности излучаемой частоты порядка 2 МГц.

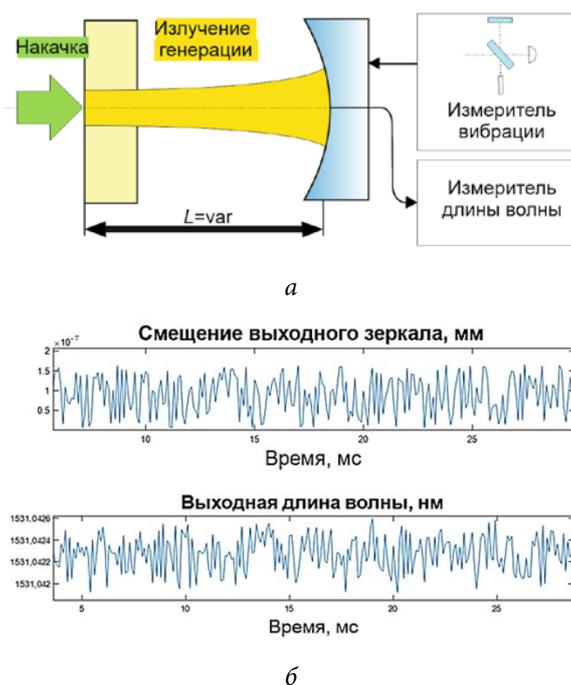
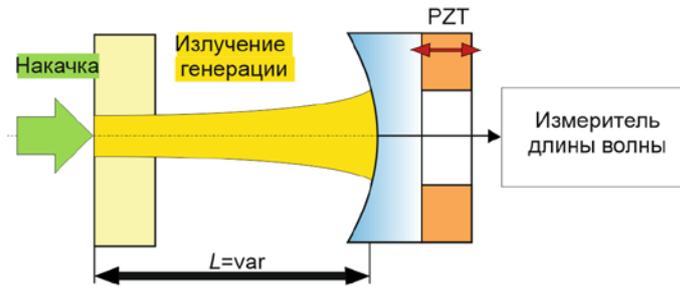


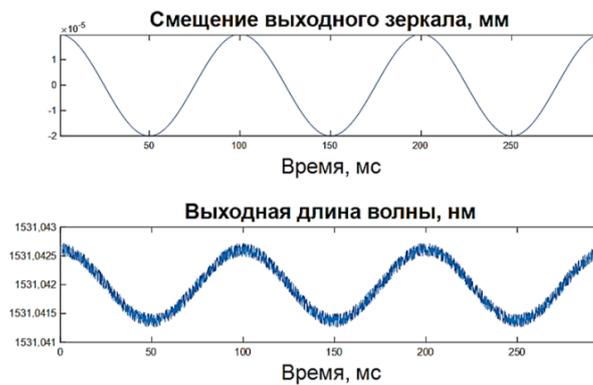
Рис. 4. Измерение нестабильности генерируемой длины волны:

а — схема установки; *б* — пример снимаемых сигналов

Схема, показанная на рис. 5, включает в себя пьезоэлектрический актюатор ПП-12 АО «НИИ “Элпа”» с подключенным к нему источником напряжения, задавая определенные значения напряжения на котором, можно обеспечивать изменение размера актюатора по высоте цилиндра, создавая колебания выходного зеркала, радиус кривизны которого определяет идеальную длину резонатора, относительно начального положения с определенной частотой и амплитудой. Излучение лазера также анализировалось на измерителе длины волны. Отметим, что в случае воздействия на выходное зеркало пьезоэлектрическим актюатором вызываемые таким образом вынужденные колебания по своей амплитуде превосходят случайные колебания положения компонента вследствие вибраций на несколько порядков, т. е. в данном эксперименте являются определяющим воздействием для выявления чувствительности длины волны к нестабильности длины резонатора. Таким образом, была экспериментально осуществлена оценка степени влияния внешних вибраций на стабильность генерируемой длины волны и подтверждено теоретически полученное значение коэффициента чувствительности выходной длины волны к колебаниям компонентов резонатора $S \cong 3 \cdot 10^{-5}$.



а



б

Рис. 5. Измерение чувствительности генерируемой длины волны к колебаниям компонентов резонатора:

а — схема установки; б — пример снимаемых сигналов

Заключение. По итогам проведенных исследований возможности создания стабилизированного по частоте излучения лазера на $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ -фосфатном стекле было установлено, что флуктуации частоты для предложенной схемы лазера возникают вследствие подверженности компонентов внешним вибрационным воздействиям. Данная зависимость имеет линейный характер, выявленный по результатам как теоретического анализа, так и экспериментального исследования, проведенного по двум предложенным в работе схемам. То есть задача обеспечения высокой стабильности частоты при рассмотрении лишь кратковременных флуктуаций решается путем обеспечения высокой стабильности положения компонентов резонатора друг относительно друга. В связи с этим можно сделать вывод о том, что лазер, собранный в виде лабораторной установки на юстировочных элементах, обладает недостатками (большое количество степеней свободы компонент), которые должны быть устранены в итоговой конструкции лазера. Возможным вариантом решения задачи пространственной стабилизации компонентов резонатора является сборка лазера в виде жёсткой конструкции, например, тубуса, который должен быть разра-

ботан так, чтобы обеспечивать необходимую высокую точность и постоянство положения компонентов резонатора, а значит, и высокую стабильность частоты излучения.

Литература

- [1] Pnirov A., Zhirnov A., Shelestov D., et al. Yb,Er:glass Microlaser at 1.5 μm for optical fibre sensing: development, characterization and noise reduction. *ACTA IMEKO*, 2016, vol. 5, no. 4, pp. 24–28.
- [2] Жирнов А.А. Фазочувствительный рефлектометр на основе перестраиваемого по частоте излучения твердотельного иттербий-эрбиевого лазера. Дисс. ... канд. тех. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.
- [3] Сверчков С.Е. 1.5 мкм иттербий-эрбиевые лазеры с диодной накачкой – элементная база и генерационные возможности. Дисс. ... док. физ.-мат. наук. М., ИОФ РАН, 2005.
- [4] Taccheo S., Laporta P., Longhi S., et al. Diode-pumped bulk erbium-ytterbium lasers. *Applied Phys. B*, 1996, vol. 63, no. 5, pp. 425–436. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01828937>
- [5] Тарасов Л.В. Физика лазера. М., Либроком, 2011.
- [6] Звелто О. Принципы лазеров. СПб., Лань, 2008.
- [7] Choban T.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O., et al. Ф-OTDR based on tunable Yb-Er:phosphate-glass laser. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1410, art. 012108. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012108>
- [8] Tsepulin V.G., Perchik A.V., Tolstoguzov V.L., et al. Thin film thickness measurement error reduction by wavelength selection in spectrophotometry. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2015, vol. 584, art. 012011. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/584/1/012011>

Чобан Татьяна Васильевна — студентка кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Жирнов Андрей Андреевич — кандидат технических наук, младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Карасик Валерий Ефимович, доктор технических наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чобан Т.В., Жирнов А.А. Исследование возможности создания твердотельного $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$ лазера с повышенной стабильностью частоты излучения. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 05(46). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-05-613>

**INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF CREATING A SOLID-STATE
YB³⁺:ER³⁺ LASER WITH INCREASED STABILITY
OF THE RADIATION FREQUENCY**

T.V. Choban

chobantv@yandex.ru

SPIN-code: 1867-4032

A.A. Zhirnov

zhirnovrl@gmail.com

SPIN-code: 9472-8399

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Today, various fields of science and technology use instruments, an important functional unit of which is a laser that emits in the region of 1.5 μm and has high stability of the generated wavelength. In this work, the possibility was studied of creating a radiation source that meets these requirements. The design was proposed of a solid-state laser based on Er³⁺:Yb³⁺ phosphate glass, the causes were investigated of frequency fluctuations in such a scheme, and experimental setups were proposed to determine the nature of the dependence of the radiation frequency fluctuations on component vibrations resonator.

Keywords

Solid-state laser, resonator, frequency fluctuations, spectrum, wavelength stability, modeling, Fabry-Perot interferometer, degrees of freedom, vibration, sensitivity

Received 14.05.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Pniiov A., Zhirnov A., Shelestov D., et al. Yb,Er:glass Microlaser at 1.5 μm for optical fibre sensing: development, characterization and noise reduction. *ACTA IMEKO*, 2016, vol. 5, no. 4, pp. 24–28.
- [2] Zhirnov A.A. Fazochuvstvitel'nyy reflektometr na osnove perestraivaemogo po chastote izlucheniya tverdotel'nogo itterbiy-erbievogo lazera. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Phase sensitive reflectometer based on frequency-tuned solid-state Yb-Er laser. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2019 (in Russ.).
- [3] Sverchkov S.E. 1.5 mkm itterbiy-erbievye lazery s diodnoy nakachkoy – elementnaya baza i generatsionnye vozmozhnosti. Diss. dok. fiz.-mat. nauk [1.5 μm Yb-Er lasers with diode pumping – element base and generation possibilities. Kand. doc. phys.-math. sci. diss.]. Moscow, IOF RAN Publ., 2005 (in Russ.).
- [4] Taccheo S., Laporta P., Longhi S., et al. Diode-pumped bulk erbium-ytterbium lasers. *Applied Phys. B*, 1996, vol. 63, no. 5, pp. 425–436. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01828937>
- [5] Tarasov L.V. Fizika lazera [Laser physics]. Moscow, Librokom Publ., 2011 (in Russ.).
- [6] Svelto O. Principles of lasers. Plenum Press, 1989. (Russ. ed.: Printsipy lazerov. Sankt-Petersburg, Lan' Publ., 2008.)
- [7] Choban T.V., Zhirnov A.A., Chernutsky A.O., et al. Φ -OTDR based on tunable Yb-Er:phosphate-glass laser. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1410, art. 012108. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012108>
- [8] Tsepulin V.G., Perchik A.V., Tolstoguzov V.L., et al. Thin film thickness measurement error reduction by wavelength selection in spectrophotometry. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2015, vol. 584, art. 012011. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/584/1/012011>

Choban T.V. — Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Zhirnov A.A. — Cand. Sc. (Eng.), Junior Researcher, REC of Photonics and IR Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Karasik V.E., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Choban T.V., Zhirnov A.A. Investigation of the possibility of creating a solid-state YB³⁺:ER³⁺ laser with increased stability of the radiation frequency. *Politeknicheskij molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 05(46). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-05-613.html> (in Russ.).