

УДК 621.373.826

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В Yb-Er-СТЕКЛЕ ПРИ ДИОДНОЙ НАКАЧКЕ

В.Ю. Храмов<sup>a</sup>, И.В. Чавкин<sup>a</sup>, К.М. Чавкина<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: [ivanchavkin@gmail.com](mailto:ivanchavkin@gmail.com)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 30.10.15, принята к печати 03.02.16

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-265-270

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования** Храмов В.Ю., Чавкин И.В., Чавкина К.М. Исследование термооптических неоднородностей в Yb-Er-стекле при диодной накачке // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 265–270. doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-265-270

### Аннотация

**Предмет исследования.** Разработан и представлен метод изучения термооптических искажений в твердотельных лазерах, который легко может быть использован для исследования активных элементов малого (порядка 2 мм) диаметра. **Метод.** Описанный в данной работе экспериментальный метод основан на регистрации отклонения энергетического центра пробного пучка, проходящего через термонапряженный активный элемент. **Основные результаты.** Получены экспериментальные результаты исследования оптической силы тепловой линзы в активном элементе из Yb-Er-стекла при поперечной лазерной диодной накачке в режиме без генерации, в режиме свободной генерации и в режиме модуляции добротности. Приведены полученные зависимости величины оптической силы от энергии накачки. Измерения проводились для двух компонент поляризации на двух длинах волн (632,8 нм и 1550 нм), что позволило показать отсутствие явно выраженного астигматизма тепловой линзы. **Практическая значимость.** Знание особенностей теплового режима работы подобных лазеров позволит более точно рассчитывать параметры резонатора в условиях возникновения тепловой линзы.

### Ключевые слова

Yb-Er-стекло, термооптика, тепловая линза, диодная накачка, малогабаритные активные элементы

## RESEARCH OF THERMO-OPTICAL INHOMOGENEITIES IN Yb-Er GLASS AT DIODE PUMPING

V.Yu. Khramov<sup>a</sup>, I.V.Chavkin<sup>a</sup>, K.M.Chavkina<sup>a</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: [ivanchavkin@gmail.com](mailto:ivanchavkin@gmail.com)

### Article info

Received 30.10.15, accepted 03.02.16

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-265-270

Article in Russian

**For citation:** Khramov V.Yu., Chavkin I.V., Chavkina K.M. Research of thermo-optical inhomogeneities in Yb-Er glass at diode pumping. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 265–270. doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-265-270

### Abstract

**Subject of Research.** Investigation method of thermo-optical distortions in solid-state lasers was developed and presented. The method can be easily used for research of small diameter (approximately 2 mm) active elements. **Method.** The experimental method described in this paper is based on the registration of deviation of the energy center of the probe beam passing through the thermally stressed active element. **Main Results.** We have presented experimental results of the thermal lens optical power research in the active element made of Yb-Er glass pumped transversely by a laser diode in the following modes: without generating, free-running and Q-switching. We have submitted obtained dependences of the optical power on the pumping energy. The measurements have been performed for the two polarization components at two wavelengths (632.8 nm and 1550 nm) showing the absence of explicit astigmatism of the thermal lens. **Practical Relevance.** Knowledge of the thermal regime of such lasers gives the possibility for more precise calculation of the resonator parameters in terms of the thermal lens occurrence.

### Keywords

Yb-Er glass, thermo-optics, thermal lens, diode pumping, compact active elements

### Введение

На сегодняшний день в лазерных дальномерах часто используются лазеры на Yb-Er-стекле с диодной накачкой с выходной энергией 8–12 мДж и частотой повторения импульсов до 10 Гц [1–3]. Актуальной задачей является повышение выходной энергии и частоты повторения импульсов, однако ряд факторов препятствует этому. Один из них – это термическая прочность активных элементов, а второй – термооптические искажения в активной среде [4]. Поскольку термооптические искажения наблюдаются при градиенте температур, гораздо меньшем порога термического разрушения активного элемента (АЭ), и оказывают существенное влияние на выходные характеристики лазера [5], то необходимо их подробное изучение.

Так как в работе рассматриваются твердотельные лазеры на основе эрбиевых стекол, которые отличаются низкой теплопроводностью, термоиндуцированные эффекты в таких лазерах оказывают существенное влияние на их работу. Влияние тепловой линзы (ТЛ) в первую очередь сказывается на увеличении расходимости выходного лазерного излучения, а другие термооптические неоднородности и вынужденное двулучепреломление, проявляющееся в Yb-Er активном элементе при высоких энергиях накачки, приводят к снижению эффективности генерации. В различных работах [6–9] описываются особенности работы малогабаритных неохлаждаемых лазеров на Yb-Er-стекле в условиях термооптических искажений активных элементов. Очевидна необходимость их учета при расчете лазерных оптических систем, таких, например, как лазерные дальномеры с дальностью работы до нескольких десятков километров. Однако детального исследования этих эффектов применительно к лазерам данного типа до настоящего времени не проводилось. В частности, отсутствуют достоверные данные о термооптических характеристиках современных высокоэффективных лазерных Yb-Er фосфатных стекол.

Поскольку задача измерения оптической силы ТЛ в лазерном АЭ не является тривиальной и требует учета множества факторов, включая геометрию активной среды, то с целью выбора оптимального метода измерения оптической силы ТЛ были рассмотрены несколько методов:

- интерференционный метод [5];
- метод измерения расходимости измерительного пучка, прошедшего через термонапряженный активный элемент [10, 11];
- метод «срыва» генерации [12, 13];
- определение термооптических аберраций с использованием отклонения измерительного пучка лазера [14].

Первый метод позволяет получать максимально точную картину искажений в АЭ, но имеет высокую чувствительность к разбюстировкам, вибрациям и тепловым потокам, а также затрудняет получение достоверной информации при наличии дополнительных отражающих поверхностей. В нашем случае при измерении ТЛ в активных элементах малого диаметра возможно возникновение дополнительной ошибки, связанной с дифракцией на апертуре АЭ. Второй метод прост в реализации, с его помощью возможно измерение фокусного расстояния термонаведенной линзы, но он не дает полную картину термооптических искажений АЭ. Метод «срыва» также не позволяет подробно исследовать термооптические искажения по сечению АЭ. К тому же он не позволяет исследовать ТЛ в АЭ вне резонатора, что не допускает комплексного подхода к изучению термооптических искажений в АЭ. Последний метод прост в реализации и позволяет достаточно подробно оценить распределение термооптических неоднородностей по сечению АЭ, включая тепловую линзу, тепловой клин и деполяризацию.

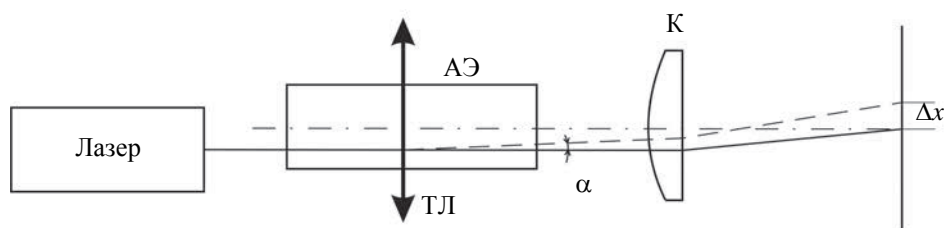


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для изучения термооптических неоднородностей при помощи измерительного пучка лазера: АЭ – активный элемент; ТЛ – тепловая линза; К – длиннофокусная линза; Э – экран,  $\Delta x$  – смещение пробного пучка

Таким образом, наиболее подходящим методом для решения поставленной в настоящей работе задачи является метод сканирования АЭ измерительным пучком. На рис. 1 представлена схема эксперимента последнего метода. При наведении ТЛ в АЭ лазерный пучок отклоняется на некий угол  $\alpha$ . В фокальной плоскости длиннофокусной линзы (К) расположен экран, на котором наблюдается линейное смещение пятна излучения. Достоинства этого метода – простота исполнения экспериментального стенда и однозначность результатов, так как относительное смещение пучка в фокальной плоскости коллиматора обратно пропорционально фокусу тепловой линзы и не зависит от других факторов. Таким образом, в осно-

ве этого метода лежат не вызывающие сомнения законы геометрической оптики. К тому же данный метод позволяет достаточно подробно оценить распределение термооптических aberrации по сечению АЭ, включая ТЛ, тепловой клин и деполяризацию. Необходимым условием является формирование достаточно тонкого измерительного пучка, диаметр которого определяет пространственное разрешение метода.

Цель настоящей работы заключалась в реализации метода измерения пробным пучком термооптических неоднородностей в малогабаритном АЭ в режиме без генерации, свободной генерации и модуляции добротности и получении экспериментальных зависимостей оптической силы тепловой линзы от энергии накачки.

### Описание экспериментальной установки

Для реализации выбранного метода был разработан экспериментальный стенд, схема которого представлена на рис. 2.

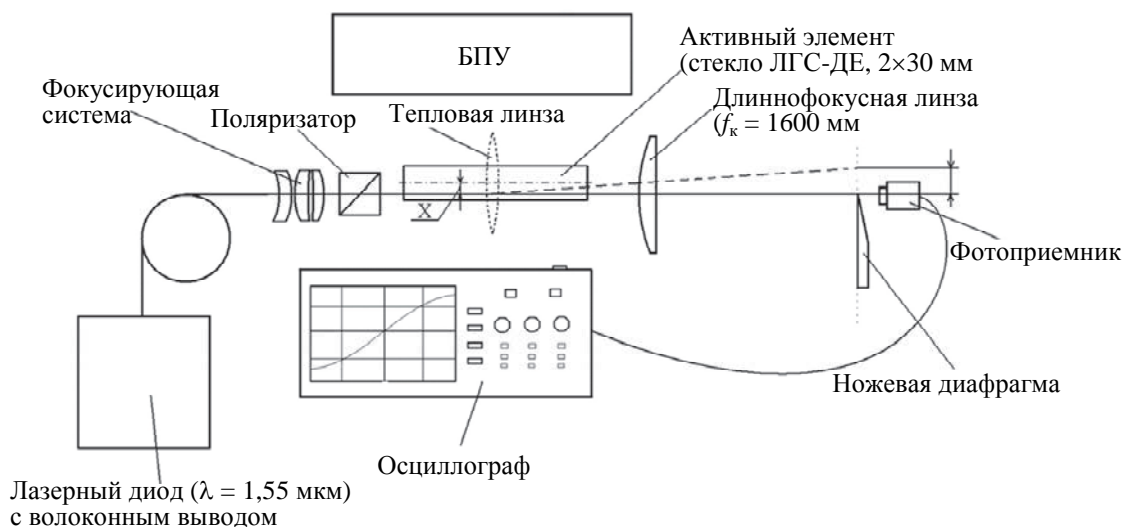


Рис. 2. Схема экспериментального стенда  
(БПУ – блок питания и управления лазера,  $F$  – фокальная плоскость линзы)

В связи с тем, что исследование проводилось на малогабаритном АЭ с размерами  $2 \times 30$  мм, необходимо было сформировать узкий пучок измерительного лазера. Для этого излучение лазерного диода вводилось в одномодовое оптическое волокно с числовой апертурой 0,14, из которого выходил пучок, близкий к Гауссову. Пучок фокусировался с помощью специально подобранной оптической системы внутрь АЭ. При этом размер пучка в АЭ по всей длине не превышал 300 мкм. Макет излучателя был установлен на подвижке с возможностью перемещения его в поперечной оптической оси плоскости в горизонтальном и вертикальном направлении с шагом 10 мкм. При этом пробный пучок мог перемещаться по сечению АЭ. Между объективом и АЭ для получения линейно поляризованного излучения был установлен поляризатор Глана. Плоскость поляризации лазерного пучка при этом могла ориентироваться вдоль горизонтальной или вертикальной оси. На выходе из АЭ установлена длиннофокусная линза ( $f_k = 1600$  мм) из комплекта оптической скамьи ОСК-2, в фокальной плоскости линзы – оптическая ножевая диафрагма с возможностью перемещения в двух координатах с шагом 10 мкм, а за ней – фотоприемник.

Нужно подчеркнуть, что для получения максимально достоверных результатов в качестве измерительного пучка было использовано излучение лазерного диода с длиной волны, близкой к длине волны генерации (1,55 мкм).

Измерения проводились следующим образом. До включения накачки ножевая диафрагма перемещалась и постепенно перекрывала пучок измерительного лазера до тех пор, пока мощность падающего на фотоприемник излучения не становилась ровно в 2 раза меньше мощности излучения без диафрагмы. Эта координата соответствовала энергетическому центру пучка. После включения накачки и соответственно смещения пучка повторялось аналогичное измерение для нахождения координаты энергетического центра пучка.

Эксперименты проводились на макете, созданном на основе ранее оптимизированного варианта лазера<sup>1</sup>, рассчитанного на работу с частотой следования импульсов 10–15 Гц и с выходной энергией излучения 10–15 мДж при длительности импульса генерации 30 нс. В качестве накачки использовались три стоваттные лазерные диодные линейки с длиной волны генерации 940 нм. Измерительный пучок перемещался по сечению АЭ в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 3).

<sup>1</sup> Л112-ЭД, АО «ЛОМО», Россия, Разработки ЛОМО. Импульсный лазерный излучатель с диодной накачкой [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lomo-tech.ru/?a=4&b=5&c=4>, свободный. Яз. рус.

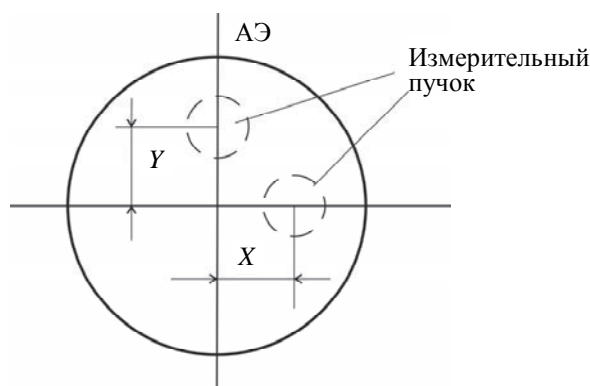


Рис. 3. Изображение зоны прохождения измерительного пучка через активный элемент

### Результаты и обсуждения

Измерения проводились на частоте повторения импульсов 10 Гц. Изменение энергии накачки производилось за счет регулировки ее длительности. После включения накачки в течение 15–20 с происходило установление стационарного теплового режима.

При обработке результатов для каждого значения смещения  $X$ ,  $Y$  измерительного пучка от центра АЭ была рассчитана оптическая сила наведенной тепловой линзы по следующей формуле:

$$D_{\text{тл}} = \frac{1}{f_{\text{тл}}} = \frac{\Delta x}{X \cdot f_k},$$

где  $D_{\text{тл}}$  – оптическая сила наведенной линзы;  $f_{\text{тл}}$  – фокусное расстояние тепловой линзы;  $\Delta x$  – смещение центра пучка в фокальной плоскости  $F$  длиннофокусной линзы (рис. 2);  $X$  – смещение измерительного пучка относительно центра АЭ;  $f_k$  – фокусное расстояние линзы (рис. 2).

Далее было проведено усреднение полученных значений оптической силы для каждого значения энергии накачки и построены графики зависимости оптической силы от энергии накачки для двух компонент поляризации (рис. 4).

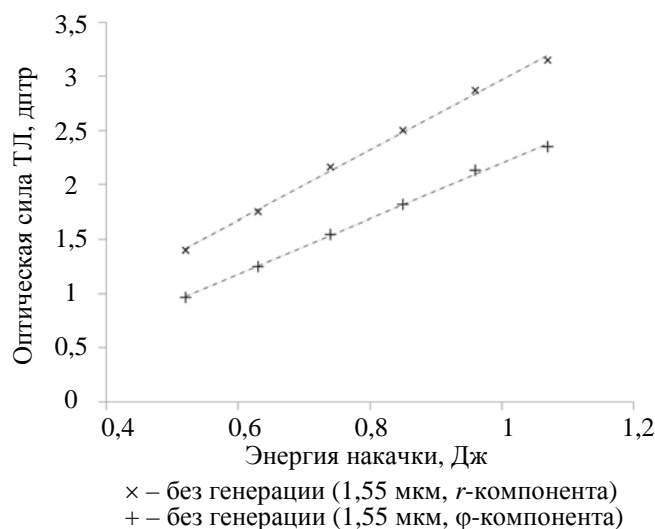


Рис. 4. Экспериментальная зависимость оптической силы тепловой линзы от энергии накачки на длине волны 1,55 мкм

Следует заметить, что при повороте поляризации измерительного пучка на 90° оптические силы тепловых линз для двух компонент поляризации поменялись местами, что говорит об отсутствии явно выраженного астигматизма тепловой линзы.

Разница между оптическими силами для  $r$ - и  $\phi$ -компонент поляризации объясняется тем, что в термонапряженном цилиндрическом активном элементе при прохождении линейно поляризованного света происходит изменение состояния поляризации. Другими словами, такой АЭ может быть представлен как фазовая пластинка с переменными по сечению направлениями главных осей. Для расчета приращенния светового пути для двух компонент поляризации используются следующие формулы [5]:

$$\Delta L_r(r) = l \cdot [T_k(r) \cdot (P + Q) + \bar{T}(W - P) - \bar{T}(r) \cdot Q],$$

$$\Delta L_\phi(r) = l \cdot [T_k(r) \cdot (P - Q) + \bar{T}(W - P) + \bar{T}(r) \cdot Q].$$

Оптические силы ТЛ для двух компонент поляризации описываются следующей формулой [5, 11]:

$$D_{r,\varphi} = \frac{P_T}{2 \cdot \lambda_T \cdot S} \left( P \pm \frac{Q}{2} \right).$$

Здесь  $l$  – длина активного элемента;  $T_k(r)$  – температура внутри АЭ на расстоянии  $r$  от центра;  $\bar{T}$  – среднее по сечению приращение температуры;  $P_T$  – общая мощность тепловыделений в АЭ;  $\lambda_T$  – теплопроводность материала;  $S$  – площадь поперечного сечения активного элемента; параметр  $W$  характеризует среднее увеличение оптического пути, пропорциональное среднему по сечению приращению температуры. Термооптическая характеристика  $P$  пропорциональна усредненной для двух компонент поляризации оптической силе ТЛ. Величина  $Q$  определяет разницу оптических сил тепловых линз для ортогональных поляризаций [5].

Как видно из вышеприведенных формул, оптическая сила ТЛ, образующаяся в цилиндрическом элементе, явно зависит от площади сечения АЭ, полной мощности тепловыделения и от термооптических параметров материала.

Учитывая что аналогичные измерения на длине волны 1,55 мкм не могли быть произведены с установленным резонатором в режиме свободной генерации и модуляции добротности (с учетом отражения на глухом зеркале резонатора), были проведены аналогичные измерения с использованием излучения He-Ne-лазера ( $\lambda = 632,8$  нм). Для этого лазерный диод с длиной волны 1,55 мкм был заменен на He-Ne-лазер ЛГН-302. Диаметр пучка He-Ne-лазера в АЭ после фокусировки также не превышал 300 мкм. С использованием полученных данных для двух длин волн были получены дисперсионные соотношения для термооптических констант  $P$  и  $Q$ :

$$P_{1,55} = 0,92P_{632},$$

$$Q_{1,55} = 1,15Q_{632},$$

где  $P_{1,55}$  и  $Q_{1,55}$  – термооптические параметры для длины волны 1,55 мкм;  $P_{632}$  и  $Q_{632}$  – термооптические параметры для длины волны 632,8 нм. Поскольку полученные зависимости определяют однозначную связь между термооптическими характеристиками на двух длинах волн, это дает возможность проведения в дальнейшем исследования на длине волны 632,8 нм с последующим пересчетом результатов для длины волны 1,55 мкм.

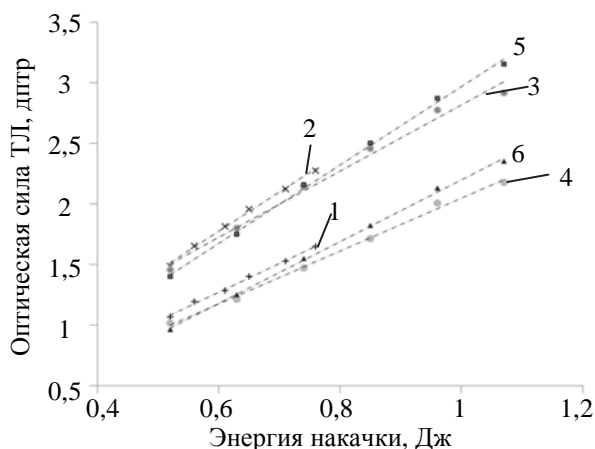


Рис. 5. Пересчитанные зависимости оптической силы тепловой линзы на длине волны 1,55 мкм в Yb-Er-стекле при диодной накачке в разных режимах: 1 – модуляция добротности ( $\varphi$ -компонента), 2 – модуляция добротности ( $\gamma$ -компонента), 3 – свободная генерация ( $\gamma$ -компонента), 4 – свободная генерация ( $\varphi$ -компонента), 5 – без генерации ( $\gamma$ -компонента), 6 – без генерации ( $\varphi$ -компонента)

Как видно из рис. 5, тепловыделение в АЭ не сильно отличается для этих трех режимов, в отличие от неодимовых лазеров, у которых тепловыделение в режиме без генерации на 10–20 % выше, чем в режиме с генерацией [5, 15]. В Yb-Er лазерной среде все усложняется за счет присутствия каналов потерь энергии возбуждения, вклад в тепловыделение которых зависит от степени инвертирования лазерной среды [12]. Также было установлено, что оптические силы тепловой линзы для двух поляризаций отличаются приблизительно на 30%, что необходимо учитывать при использовании в лазере поляризующих компонентов.

### Заключение

Получены экспериментальные зависимости оптической силы тепловой линзы от энергии накачки в трех режимах работы лазера. Апробирован метод изучения термооптических неоднородностей в твердотельных лазерах, который может быть применен для исследования активных элементов малого диаметра (около 2 мм). Оптические силы линз измерены на двух длинах волн, установлены приближенные диспер-

сионные соотношения для термооптических характеристик  $P$  и  $Q$ , что важно учитывать при оптимизации лазеров.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что оптические силы практически линейно зависят от энергии накачки. Измерение в различных режимах работы лазера показало, что оптические силы тепловых линз для всех режимов очень близки, что достаточно очевидно в связи с низким КПД лазеров на Yb-Er-стекле.

### References

1. Kabanov V.V., Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Ryabtsev A.G., Ryabtsev G.I., Shchemelev M.A. Compact Erbium lasers with pulse repetition frequency of 1-5 Hz for spectroscopy and ranging techniques. *Proc. VIII Int. Conf. on Laser Physics and Optical Technologies*. Minsk, Belarus', 2010, vol. 1, pp. 86–87.
2. Abazadze A.Yu., Bykov V.N., Zverev G.M., Pleshkov A.A., Simakov V.A. Highly efficient minilaser with transverse pulsed semiconductor pumping for eye-safe laser range-finding. *Quantum Electronics*, 2002, vol. 32, no. 3, pp. 210–212.
3. Gapontsev V.P., Matitsin S.M., Isineev A.A., Kravchenko V.B. Erbium glass lasers and their applications. *Optics and Laser Technology*, 1982, vol. 14, no. 4, pp. 189–196. doi: 10.1016/0030-3992(82)90095-0
4. Liu S., Song F., Cai H., Li T., Tian B., Wu Z., Tian J. Effect of thermal lens on beam quality and mode matching in LD pumped Er-Yb-codoped phosphate glass microchip laser. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, vol. 41, no. 3, art. 035104. doi: 10.1088/0022-3727/41/3/035104
5. Mezenov A.V., Soms L.N., Stepanov A.I. *Termooptika Tverdotel'nykh Lazeroz* [Thermooptics of Solid-State Lasers]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986, 199 p.
6. Batov Yu.N., Gubin A.B., Pirozhkov Yu.B., Shapiro L.L. Thermal balance in compact pulsed erbium glass lasers with diode pumping. *Journal of Optical Technology*, 2002, vol. 69, no. 9, pp. 605–609.
7. Kuchma I.G., Petrov A.A., Fromzel V.A. Effect of active-medium temperature on the lasing characteristics of erbium-glass lasers. *Optics and Spectroscopy*, 1991, vol. 71, no. 1, pp. 105–109.
8. Matsuoka J., Kitamura N., Fujinaga S., Kitaoka T., Yamashita H. Temperature dependence of refractive index of SiO<sub>2</sub> glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1991, vol. 135, no. 1, pp. 86–89. doi: 10.1016/0022-3093(91)90447-E
9. Boutchenkov V., Kuchma I., Levoshkin A., Mak A., A Petrov., Hollemann G. High efficiency diode-pumped Q-switched Yb:Er:glass lasers. *Optics Communications*, 2000, vol. 117, no. 1, pp. 383–388. doi: 10.1016/S0030-4018(00)00608-8
10. Scaggs M., Haas G. Real time monitoring of thermal lensing of a multikilowatt fiber laser optical system. *Proceeding of SPIE*, 2012, vol. 8236, art. 82360H. doi: 10.1117/12.907508
11. Koechner W. Thermal lensing in a Nd to YAG laser rod. *Applied Optics*, 1970, vol. 9, no. 11, pp. 2548–2553.
12. Byshevskaya-Konopko L.O., Vorob'ev I.L., Izyneev A.A., Sadovskii P.I. Heat dissipation accompanying lamp pumping in an erbium active element. *Journal of Optical Technology*, 2013, vol. 80, no. 10, pp. 594–600.
13. Lancaster D.G., Dawes J.M. Thermal-lens measurement of a quasi steady-state repetitive flashlamp-pumped Cr, Tm, Ho:YAG laser. *Optics and Laser Technology*, 1998, vol. 30, no. 2, pp. 103–108.
14. Stucinskas D. *Thermal Lens Diagnostics and Mitigation in Diode End Pumped Lasers*. PhD Dissertation. Vilnius University, 2010.
15. Mak A.A., Soms L.N., Fromzel' V.A., Yashin V.E. *Lazery na Neodimovom Stekle* [Nd: Glass Lasers]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 288 p.

<b>Храмов Валерий Юрьевич</b>	– доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, khramov@grv.ifmo.ru
<b>Чавкин Иван Валерьевич</b>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ivanchavkin@gmail.com
<b>Чавкина Ксения Максимовна</b>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, macksusha@mail.ru
<b>Valeriy Yu. Khramov</b>	– D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, khramov@grv.ifmo.ru
<b>Ivan V. Chavkin</b>	– postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ivanchavkin@gmail.com
<b>Kseniya M. Chavkina</b>	– postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, macksusha@mail.ru