

УДК 681.7.066

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-220-228

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЛИНЗЫ В АКТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ ЛАЗЕРНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПРИ МОЩНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКЕ

Глеб Владимирович Купцов

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б, младший научный сотрудник; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, аспирант; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, ассистент преподавателя, тел. (383)330-98-36, e-mail: kuptsov.gleb@gmail.com

Алексей Викторович Лаптев

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б, младший научный сотрудник, тел. (383)330-98-36, e-mail: alex_laptev@ngs.ru

Владимир Анатольевич Петров

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б, младший научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант, тел. (383)330-98-36, e-mail: petrov.nstu@gmail.com

Виктор Валерьевич Петров

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, ст. преподаватель; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доцент, тел. (383)330-98-36, e-mail: vpetv@laser.nsc.ru

Ефим Викторович Пестряков

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-98-36, e-mail: pefvic@laser.nsc.ru

В Институте лазерной физики СО РАН разрабатывается фемтосекундная лазерная система с частотой повторения импульсов до 1 кГц. Ключевым компонентом системы является канал лазерного усиления, основанный на кристаллах, активированных ионами Yb^{3+} . Расчетная средняя мощность на выходе канала составляет 300 Вт. При создании систем с одновременно высокой средней и пиковой мощностью тепловые эффекты в мощных лазерных усилителях являются определяющими для параметров излучения на выходе системы.

Целью данной работы является исследование зависимости величины фокусного расстояния наведенной тепловой линзы в активном элементе лазерного усилителя канала лазерного усиления от мощности диодной накачки при помощи геометрического метода.

Приведены результаты экспериментов по измерению зависимости величины тепловой линзы в активном элементе $\text{Yb}:\text{YAG}$ геометрическим методом от мощности диодной накачки в многопроходном усилителе. Определены теоретическая и экспериментальная зависимости фокусного расстояния тепловой линзы в кристалле $\text{Yb}:\text{YAG}$ от мощности диодной накачки

в диапазоне 10–120 Вт. При этом фокусное расстояние термически наведенной линзы по вертикальной оси изменялось от 5,67 до 0,44 м, по горизонтальной оси – от 3,06 до 0,4 м. Экспериментально полученные данные находятся в согласии с теоретическим расчетом фокусного расстояния тепловой линзы.

Результаты данной работы будут использованы при оптимизации энергетических, пространственных и фазовых характеристик излучения лазерного усилителя фемтосекундной лазерной системы с частотой повторения импульсов до 1 кГц.

Ключевые слова: мощный лазер, лазерный усилитель, тепловая линза, диодная накачка, торцевая накачка, гауссовы пучки, примесные ионы, ионы иттербия.

Введение

Среди активно развивающихся направлений лазерной физики выделяют создание лазерных систем с высокой средней и пиковой мощностью на активных средах, активированных ионами Yb [1–4], в том числе с волоконными элементами [5–6]. Такие системы используются как в прикладных целях [7], так и для проведения научно-исследовательских экспериментов по созданию источников для накачки параметрических усилителей [8], по генерации излучения рентгеновского и гамма-диапазонов [9], в том числе последовательностей аттосекундных импульсов [10].

В Институте лазерной физики СО РАН создается мощная фемтосекундная лазерная система, работающей с частотой повторения импульсов до 1 кГц [11–14]. Установка состоит из задающего генератора, основанного на лазерной керамике Yb:Y₂O₃ при криогенном охлаждении, канала накачки параметрического усилителя и канала параметрического усиления. Канал накачки состоит из 6-проходного Yb:YAG усилителя при комнатной температуре, после которого энергия импульса увеличивается от 0,5 мДж до 15 мДж и 32-проходного Yb:YAG лазерного усилителя, при криогенной температуре позволяющего повысить энергию импульсов до 300 мДж. Активные элементы 32-проходного усилителя охлаждаются криостатами с замкнутым циклом охлаждения. Канал параметрического усиления основан на нелинейно-оптических кристаллах LVO/BVO.

В 6-проходном усилителе, основанном на кристалле Yb:YAG, применяется двухсторонняя торцевая накачка лазерными диодами ($\lambda = 936$ нм, параметр качества пучка $M^2 \sim 100$) со средней мощностью до 140 Вт. Размер элемента $5 \times 5 \times 12$ мм, концентрация активных ионов – 5 ат. %. При создании мощных лазерных систем тепловые эффекты в активных элементах лазерных усилителей играют важную роль. При этом становится важным учет величины фокусного расстояния наведенной в кристалле тепловой линзы [15, 16]. В данной работе представлены экспериментальные данные по величине тепловой линзы в активном элементе 6-проходного усилителя с мощной диодной накачкой.

Методы

Для определения фокусного расстояния тепловой линзы применялся геометрический метод, принцип которого состоит в определении изменения расходимости излучения пилотного лазера, проходящего через активный элемент [17]. Расчет фокусного расстояния тепловой линзы основан на ABCD-теореме, описывающей распространение гауссова пучка в пространстве [18]. Если тепловую линзу принять за тонкую и расположенную в перетяжке пучка, то начальный комплексный параметр пучка q_0 с учетом того, что в перетяжке фронт волны плоский, и комплексный параметр пучка после распространения q_1 записываются, как

$$q_0 = -\frac{i\pi w_0^2}{\lambda M^2}; \quad (1)$$

$$q_1 = \left(\frac{1}{R} + \frac{i\lambda M^2}{\pi w^2} \right)^{-1} = \frac{(f-d) \cdot q_0 + f \cdot d}{f - q_0}, \quad (2)$$

где w_0 – радиус перетяжки, M^2 – параметр качества пучка [19]; λ – длина волны излучения; f – фокусное расстояние линзы; d – расстояние от перетяжки до искомой точки; R – радиус кривизны волнового фронта; w – радиус пучка. Радиус пучка w на расстоянии d от перетяжки при фокусном расстоянии линзы f выражается из мнимой части выражения (2), как

$$w(f, d) = \frac{\sqrt{(\lambda \cdot M^2 \cdot d)^2 + \left(\pi \cdot w_0^2 \cdot \left(\frac{d}{f} - 1 \right) \right)^2}}{\pi \cdot w_0}. \quad (3)$$

С использованием уравнения (3) по экспериментально измеренным параметрам w_0 и d проводится расчет фокусного расстояния тепловой линзы f . При условии, что фокус линзы f положительный, уравнение (3) имеет два корня при его решении относительно фокуса. Знаки корней в свою очередь зависят от знака d . Отрицательная величина d означает, что пучок сходящийся, т. е. перетяжка находится после исследуемой точки по направлению распространения излучения. Возникновение такого случая нельзя исключать во время проведения эксперимента, поэтому, для повышения точности расчета и исключения неоднозначности расположения перетяжки, измерения фокусного расстояния тепловой линзы проводились по двум сечениям пучка, которые фиксировались на расстоянии d_1 и d_2 от перетяжки. С учетом измерений в двух точках, поиск фокуса линзы f по экспериментальным данным осущест-

вляется простой минимизацией скалярной функции относительной ошибки $\Delta w(f)$ по параметру f :

$$\Delta w(f) = \left(\frac{\min(w(f, d_1), w_{\text{exp}}(d_1))}{\max(w(f, d_1), w_{\text{exp}}(d_1))} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\min(w(f, d_2), w_{\text{exp}}(d_2))}{\max(w(f, d_2), w_{\text{exp}}(d_2))} - 1 \right)^2, \quad (4)$$

где d_1 – расстояние до первого сечения; а d_2 – расстояние до второго сечения; $w_{\text{exp}}(d)$ – радиус перетяжки, измеренный экспериментально в соответствующем сечении. Область значений функции (4) лежит в интервале $[0; 2)$, что позволяет оценивать точность расчета фокуса по результату минимизации.

Зная температурное распределение в кристалле и значение термооптической постоянной, на основании материальных параметров термонапряженного элемента и параметров накачки можно провести расчет фокуса тепловой линзы. Согласно теории [20] зависимость фокусного расстояния тепловой линзы от поглощенной мощности накачки определяется формулой

$$f(P) = 2\pi \cdot w_{\text{нак}}^2 \cdot K \cdot \left(\eta \cdot P \cdot \frac{dn}{dT} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где K – коэффициент теплопроводности; $w_{\text{нак}}$ – радиус пучка накачки; η – часть поглощенной мощности накачки, перешедшая в тепло; P – поглощенная мощность накачки; dn/dT – термооптическая постоянная. Для кристалла Yb:YAG с концентрацией активных ионов 5 ат. % материальные параметры при комнатной температуре и накачке с центральной длиной волны 936 нм имеют следующие значения: $K = 8,5$ Вт/м, $\eta = 0,7$, $dn/dT = 10^{-6}$ К⁻¹.

Эксперименты

Мощность диодного лазера накачки изменялась в диапазоне 10–120 Вт, мощность пробного излучения составляла 50 мВт. Длина волны пробного излучения $\lambda = 1\,030$ нм, параметр качества пучка $M^2 = 1,3$. На рис. 1 представлена схема измерения фокусного расстояния тепловой линзы геометрическим методом по двум сечениям.

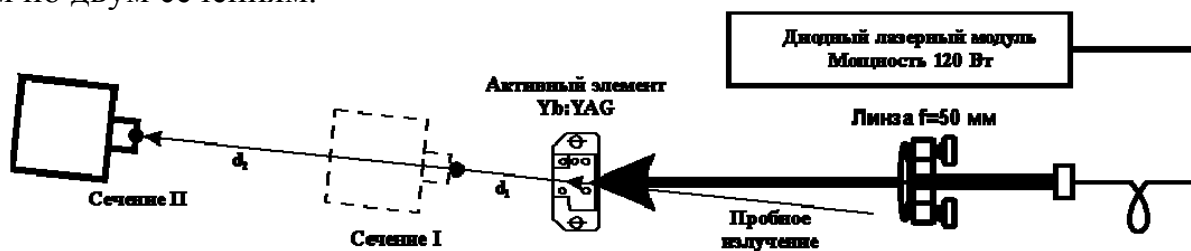


Рис. 1. Схема измерения фокуса тепловой линзы геометрическим способом

Угол между осью излучения накачки и осью пробного излучения составляет $\sim 6^\circ$. Радиус перетяжки в активном элементе составляет $\sim 500 \pm 14$ мкм для горизонтальной и $\sim 475 \pm 14$ мкм для вертикальной оси. Положение первого сечения после перетяжки находится на расстоянии $d_1 = 0,67 \pm 0,01$ м. Расстояние от перетяжки до второго сечения $d_2 = 1,45 \pm 0,01$ м. На рис. 2 представлены теоретическая и экспериментальная зависимости для вертикальной оси фокусного расстояния тепловой линзы в кристалле Yb:YAG при диодной накачке с мощностью в диапазоне 10–120 Вт. Для горизонтальной оси зависимость имеет аналогичный вид.

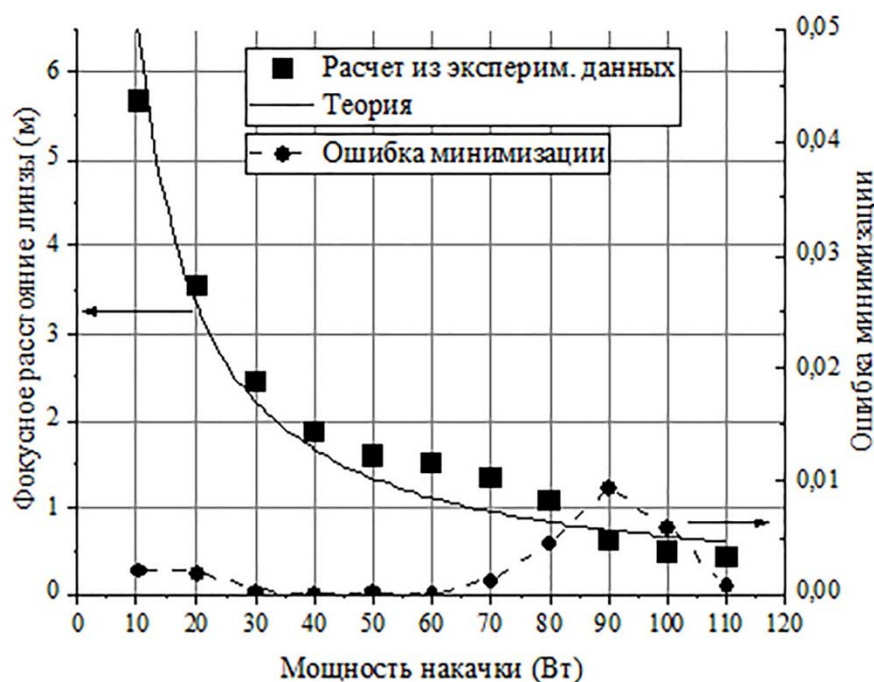


Рис. 2. Теоретическая и экспериментальная зависимости фокусного расстояния тепловой линзы от мощности накачки

Теоретическая зависимость была рассчитана для $w_{\text{нак.}} = 0,6$ мм по формуле (5) и показана сплошной кривой. Зависимость, полученная из экспериментальных данных путем минимизации функции (4), представлена квадратными символами. Также на графике показана зависимость величины ошибки минимизации от мощности накачки. Видно, что ошибка не превышает величины 0,01.

Результаты и заключение

Определены теоретическая и экспериментальная зависимости фокусного расстояния тепловой линзы в кристалле Yb:YAG от мощности диодной накачки. При изменении мощности накачки в диапазоне 10–120 Вт фокусное рас-

стояние термически наведенной линзы по вертикальной оси изменялось от 5,67 до 0,44 м, по горизонтальной оси – от 3,06 до 0,4 м. Экспериментально полученные данные находятся в согласии с теоретическим расчетом фокусного расстояния тепловой линзы. Результаты данной работы будут использованы при оптимизации энергетических, пространственных и фазовых характеристик излучения лазерного усилителя фемтосекундной лазерной системы с частотой повторения импульсов до 1 кГц.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программ фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом» и СО РАН (№ 0307-2017-0011), а также РФФИ (грант № 19-42-543007).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brown D. C., Tornegard S., Kolis J. Cryogenic nanosecond and picosecond high average and peak power (HAPP) pump lasers for ultrafast applications // High Power Laser Science and Engineering. – 2016. – Vol. 4(e15). – P. 1–31. <https://doi.org/10.1017/hpl.2016.12>.
2. Brocklesby W. S. Progress in high average power ultrafast lasers // Eur. Phys. J. Special Topics. – 2015. – Vol. 224. – P. 2529–2543.
3. Lu C.-H. [et al.] Sub-4 fs laser pulses at high average power and high repetition rate from an all-solid-state setup // Optics Express. – 2018. – Vol. 26. – P. 8941–8956.
4. Performance scaling of high-power picoseconds cryogenically cooled rod-type Yb:YAG multipass amplification / X. Fu, K. Hong, Li. Chen, F. Kartner // J. Opt. Soc. Am. B – 2013. – Vol. 30 (11). – P. 2798–2809. doi: 10.1364/JOSAB.30.002798.
5. Li F. [et al.] Hybrid high energy femtosecond laser system based on Yb:YAG single crystal fiber amplifier // Elsevier Optik. – 2017. – Vol. 156. – P. 155–160.
6. Chang Li. [et al.] High-energy, kHz, picosecond hybrid Yb-doped chirped-pulse amplifier // Optics Express. – 2015. – Vol. 23 (8). – P. 10132–10144.
7. High power lasers and their new applications / Y. Izawar, N. Miyanaga, J. Kawanaka, K. Yamakawa // Journal of the Optical Society of Korea. – 2008. – Vol. 12 (3). – P. 178–185.
8. Compact extreme ultraviolet source at megahertz pulse repetition rate with a low-noise ultrafast thin-disk laser oscillator / F. Emaury, A. Diebold, C. J. Saraceno, U. Keller // Optica. – 2015. – Vol. 2 (11). – P. 980–984. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000980>.
9. Chvykov V. [et al.] High peak and average power Ti:sapphire thin disk amplifier with extraction during pumping // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41 (13). – P. 3017–3020.
10. Wu Y. [et al.] Generation of high-flux attosecond extreme ultraviolet continuum with a 10 TW laser // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 102. – P. 201104.
11. The Multidisk Diode-Pumped High Power Yb:YAG Laser Amplifier of High-Intensity Laser System with 1 kHz Repetition Rate / G. V. Kuptsov, V. V. Petrov, V. A. Petrov, A. V. Laptev, A. V. Kirpichnikov, E. V. Pestryakov // IOP Conf. Series: JPCS. – 2018. – Vol. 999. – P. 012008
12. Optimisation of a multi-disk cryogenic amplifier for a high-intensity, high-repetition-rate laser system / V. V. Petrov, G. V. Kuptsov, V. A. Petrov, A. V. Laptev, A. V. Kirpichnikov, E. V. Pestryakov // Quantum Electronics. – 2018. – Vol. 48. – P. 358.
13. Contactless method for studying temperature within the active element of a multidisk cryogenic amplifier / V. V. Petrov, G. V. Kuptsov, A. I. Nozdrina, V. A. Petrov, A. V. Laptev, A. V. Kirpichnikov, E. V. Pestryakov // Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 49. – P. 358.

14. Исследование термооптических искажений в активных элементах криогенного мультидискового усилителя с мощной диодной накачкой / В. В. Петров, Г. В. Купцов, А. В. Лаптев, В. А. Петров, Е. В. Пестряков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 199–208.
15. Thermal lensing in diode – pumped ytterbium lasers – part II: evaluation of quantum efficiencies and thermo – optic coefficients / S. Chenais, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas, P. George // IEEE Journal of Quantum electronics. – 2004. – Vol. 40 (9). – P. 1235–1243.
16. Measurement of thermal lensing effects in high power thin disk laser / M. Shayganmanesh, M. Daemi, Z. Osgoui, S. Radmard, S. Kazemi // Optics & Laser Technology. – 2012. – Vol. 44 (7). – P. 2292–2296.
17. Thermal lensing in an end-pumped Yb:KGW slab laser with high power single emitter diodes / F. Hoos, S. Li, T. Meyrath, B. Braun, H. Giessen // Optics Express. – 2008. – Vol. 16 (9). – P. 6041–6049.
18. Kogelnik H., Li T. Laser beams and resonators // Applied Optics, – 1966. – Vol. 5 (10). – P. 1550–1567.
19. Johnston T. Beam propagation (M2) measurement made as easy as it gets: the four – cuts method // Applied Optics. – 1998 – Vol. 37 (21). – P. 4840–4850.
20. Thermal lensing in diode – pumped ytterbium lasers – part I: theoretical analysis and wavefront measurements / S. Chenais, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas, P. George // IEEE Journal of Quantum electronics. – 2004. – Vol. 40 (9). – P. 1217–1234. doi: 10.1109/JQE.2004.833198.

Получено 29.03.2019

© Г. В. Купцов, А. В. Лаптев, В. А. Петров,
В. В. Петров, Е. В. Пестряков, 2019

THE INVESTIGATION OF THERMAL LENS PROPERTIES IN THE ACTIVE ELEMENT OF LASER AMPLIFIER WITH HIGH POWER DIODE PUMP

Gleb V. Kuptsov

Institute of Laser Physic SB RAS, 15B, Akademik Lavrentiev Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher; Novosibirsk National Research State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student; Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russia, Teaching Assistant, phone: (383)330-98-36, e-mail: kuptsov.gleb@gmail.com

Alexei V. Laptev

Institute of Laser Physic SB RAS, 15B, Akademik Lavrentiev Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)330-98-36, e-mail: alex_laptev@ngs.ru

Vladimir A. Petrov

Institute of Laser Physic SB RAS, 15B, Akademik Lavrentiev Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher; Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D. Student, phone: (383)330-98-36, e-mail: petrov.nstu@gmail.com

Victor V. Petrov

Institute of Laser Physic SB RAS, 15B, Akademik Lavrentiev Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D, Senior Researcher; Novosibirsk National Research State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Lecturer; Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx

Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russia, Associate Professor, phone: (383)330-98-36, e-mail: vpetv@laser.nsc.ru

Efim V. Pestryakov

Institute of Laser Physic SB RAS, 15B, Akademik Lavrentiev Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D, Head of the Laboratory, phone: (383)330-98-36, e-mail: pefvic@laser.nsc.ru

A femtosecond laser system with a pulse repetition rate up to 1 kHz is being developed at the Institute of Laser Physics of the SB RAS. The key component of the system is the channel of laser amplification based on crystals doped with Yb³⁺ ions. The channel is designed to produce 300 W of average output power. Thermal effects in high-power laser amplifiers are decisive for the parameters of the radiation at the output of system.

The aim of the work is to define the dependence of thermal lens focal distance in Yb:YAG active element of a multipass amplifier on diode pump power using geometrical method.

In this paper the results of experimental measurements of thermal lens focal distance dependence in Yb:YAG active element on diode pump power in range 10-120 W are given. For this power range, the focal distance of the thermally induced lens changes from 5.67 to 0.44 m for vertical axis, and from 3.06 to 0.4 for horizontal axis. Calculation of the dependence thermal lens focal distance on the pump power and a comparison with experimental data are given, the results are in good agreement. All the obtained data are used for development of the all diode-pumped cryogenically cooled all solid state laser system operating at 1 kHz repetition rate.

Key words: high power laser, laser amplifier, thermal lens, diode pump, end pumping, Gaussian beams, ytterbium ions, dopant ions.

REFERENCES

1. Brown, D. C., Tornegard, S., & Kolis, J. (2016). Cryogenic nanosecond and picosecond high average and peak power (HAPP) pump lasers for ultrafast applications. *High Power Laser Science and Engineering*, 4(e15), 1–31. Retrieved from <https://doi.org/10.1017/hpl.2016.12>.
2. Brocklesby, W. S. (2015). Progress in high average power ultrafast lasers. *Eur. Phys. J. Special Topics*, 224, 2529–2543.
3. Lu, C.-H., et al. (2018). Sub-4 fs laser pulses at high average power and high repetition rate from an all-solid-state setup. *Optics Express*, 26, 8941–8956.
4. Fu, X., Hong, K., Chen, Li., & Kartner, F. (2013). Performance scaling of high-power picoseconds cryogenically cooled rod-type Yb:YAG multipass amplification. *J. Opt. Soc. Am. B*, 30(11), 2798–2809. doi: 10.1364/JOSAB.30.002798.
5. Li, F., et al. (2017). Hybrid high energy femtosecond laser system based on Yb:YAG single crystal fiber amplifier. *Elsevier Optik*, 156, 155–160.
6. Chang, Li., et al. (2015). High-energy, kHz, picosecond hybrid Yb-doped chirped-pulse amplifier. *Optics Express*, 23(8), 10132–10144.
7. Izawar, Y., Miyana, N., Kawanaka, J., & Yamakawa, K. (2018). High power lasers and their new applications. *Journal of the Optical Society of Korea*, 12(3), 178–185.
8. Emaury, F., Diebold, A., Saraceno, C. J., & Keller, U. (2015). Compact extreme ultraviolet source at megahertz pulse repetition rate with a low-noise ultrafast thin-disk laser oscillator. *Optica*, 2(11), 980–984. Retrieved from <https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000980>.
9. Chvykov, V., et al. (2016). High peak and average power Ti:sapphire thin disk amplifier with extraction during pumping. *Optics Letters*, 41(13), 3017–3020.
10. Wu, Y., et al. (2013). Generation of high-flux attosecond extreme ultraviolet continuum with a 10 TW laser. *Appl. Phys. Lett.*, 102, p. 201104.

11. Kuptsov, G. V., Petrov, V. V., Petrov, V. A., Laptev, A. V., Kirpichnikov, A. V., & Pestrjakov, E. V. (2018). The Multidisk Diode-Pumped High Power Yb:YAG Laser Amplifier of High-Intensity Laser System with 1 kHz Repetition Rate. *IOP Conf. Series: JPCS*, 999, p. 012008.
12. Petrov, V. V., Kuptsov, G. V., Petrov, V. A., Laptev, A. V., Kirpichnikov, A. V., & Pestrjakov, E. V. (2018). Optimisation of a multi-disk cryogenic amplifier for a high-intensity, high-repetition-rate laser system. *Quantum Electronics*, 48, p. 358.
13. Petrov, V. V., Kuptsov, G. V., Nozdrina, A. I., Petrov, V. A., Laptev, A. V., Kirpichnikov, A. V., & Pestrjakov, E. V. (2019). Contactless method for studying temperature within the active element of a multidisk cryogenic amplifier. *Quantum Electronics*, 49, p. 358.
14. Petrov, V. V., Kuptsov, G. V., Laptev, A. V., Petrov, V. A., & Pestrjakov, E. V. (2018). Investigation of thermo-optical distortions in active media of cryogenic multidisc diode-pumped amplifier. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2018: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-2018 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptics-2018]* (pp. 199–208). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
15. Chenais, S., Balembois, F., Druon, F. Lucas, G., & George, P. (2004). Thermal lensing in diode – pumped ytterbium lasers – part II: evaluation of quantum efficiencies and thermo – optic coefficients. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 40(9), 1235–1243.
16. Shayganmanesh, M., Daemi, M., Osgoui, Z., Radmard, S., & Kazemi, S. (2012). Measurement of thermal lensing effects in high power thin disk laser. *Optics & Laser Technology*, 44(7), 2292–2296.
17. Hoos, F., Li, S., Meyrath, T., Braun, B., & Giessen, H. (2008). Thermal lensing in an end-pumped Yb:KGW slab laser with high power single emitter diodes. *Optics Express*, 16(9), 6041–6049.
18. Kogelnik, H., & Li, T. (1966). Laser beams and resonators. *Applied Optics*, 5(10), 1550–1567.
19. Johnston, T. (1998). Beam propagation (M2) measurement made as easy as it gets: the four – cuts method. *Applied Optics*, 37(21), 4840–4850.
20. Chenais, S., Balembois, F., Druon, F. Lucas, G., & George, P. (2004). Thermal lensing in diode – pumped ytterbium lasers – part I: theoretical analysis and wavefront measurements. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 40(9), 1217–1234. doi: 10.1109/JQE.2004.833198.

Received 29.03.2019

© G. V. Kuptsov, A. V. Laptev, V. A. Petrov,
V. V. Petrov, E. V. Pestrjakov, 2019