

УДК 535.417.26

© Д. А. Горячкин, А. Ю. Родионов, Е. Н. Соснов, В. И. Купренюк, 2022

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С КОРРЕКЦИЕЙ ТЕПЛОЙ ЛИНЗЫ В РЕЗОНАТОРЕ. I. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Важнейшими характеристиками твердотельного лазера для научных и технологических применений являются высокая яркость и малая угловая расходимость выходного излучения. В серии из двух работ рассматривается методика численной оптимизации конфигурации резонатора лазера, построенного на базе серийного квантрона с компенсацией наведенной термолинзы, и проведена ее экспериментальная верификация. Компенсация осуществляется путем введения в резонатор отрицательной и положительной корректирующих линз, в результате чего появляется возможность получить в резонаторе длиной 1500 мм выходное излучение в виде гауссова пучка с малой угловой расходимостью, пригодного для научных исследований.

Кл. сл.: лазерный квантрон, наведенная термолинза, гауссов пучок, корректирующая линза, апертурная диафрагма

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее простым способом создания твердотельного лазера для научных исследований является использование серийно производимого рядом компаний (см., например, [1, 2]) базового элемента, т.н. лазерного квантрона, с требуемым уровнем выходной мощности. Современные лазерные квантроны представляют собой компактные модули оптимизированной конструкции, содержащие активную среду, как правило, на основе стержня Nd:YAG, а также систему поперечной диодной накачки со встроенными элементами системы жидкостного охлаждения. Имеется также широкий выбор источников питания для диодов накачки и охлаждающих устройств, которые нетрудно подобрать к выбранному типу квантрона. За исследователем, как правило, остается разработка лазерного резонатора, состав и параметры которого определяются требованиями к выходному излучению лазера, которые задаются, исходя из необходимости решения той или иной исследовательской задачи.

Характерной особенностью всех твердотельных лазерных квантронов с поперечной диодной накачкой является наличие наведенной положительной тепловой линзы [2, 3], оптическая сила которой зависит от тока накачки. По этой причине выходная мощность серийных приборов обычно калибруется производителем с применением простейшего двухзеркального плоского резонатора с длиной в несколько десятков сантиметров.

Понятно, что угловая расходимость излучения лазера (оптическое качество) с подобным резонатором не может быть малой, что не позволяет использовать его в большинстве научных и технологических применений. Известны способы компенсации тепловой линзы в активной среде и повышения качества выходного излучения с применением, например, неустойчивого резонатора [4] или резонатора с динамически деформируемым задним зеркалом [5].

Отметим, что при этом длина резонатора остается достаточно короткой, а этот параметр в ряде применений является важным. Например, при реализации режима генерации ультракоротких импульсов (УКИ) методом активной синхронизации продольных мод [6, 7] количество этих мод, а значит и длина резонатора должны быть достаточно большими, а межмодовый интервал, определяющий требования к частоте работы электрооптического модулятора (ЭОМ), не слишком велик. Так, при длине резонатора $L=1500$ мм, межмодовый интервал составляет 100 МГц, что позволило в нашей работе [6] разумно удовлетворить требование по быстродействию драйвера ЭОМ и получить генерацию импульсов субнаносекундной длительности.

В работе [6] сообщалось о возможности компенсации термолинзы в квантроне GN-50 [2] при введении в резонатор с интерферометром Майкельсона (ИМ) длиной 1500 мм двух линз, однако ток накачки при этом был строго фиксированным, и выходная мощность лазера не превышала 0.5 Вт.

В настоящей серии из двух работ (см. также [8]) приведены результаты экспериментальных исследований и расчета структуры поперечных мод резонатора [6], оптимизации фокусов и мест установки корректирующих линз для получения режима генерации на одной низшей моде при возможно более широкой апертуре моды в активном стержне. Получено выходное излучение с распределением интенсивности, близким к гауссовому, при уровне выходной мощности до 5 Вт. При этом разработанная схема отличалась слабой чувствительностью к изменению тока накачки лазерных диодов в области больших токов, представляющих на практике наибольший интерес.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При построении оптического резонатора с плоскими зеркалами с длиной 1500 мм на квантроне с поперечной диодной накачкой необходимо компенсировать влияние положительной термолинзы, оптическая сила которой зависит от тока накачки. Резонатор при наличии термолинзы становится неустойчивым, и генерация прекращается, если фокусное расстояние наведенной термолинзы соответствует или несколько превышает длину резонатора.

Результаты экспериментальных измерений фокусного расстояния термолинзы, наведенной в квантроне GN-50 (в приближении чисто сферической линзы), полученные для видимого излучения гелий-неонового лазера в зависимости от тока диодов накачки, приведены на рис. 1.

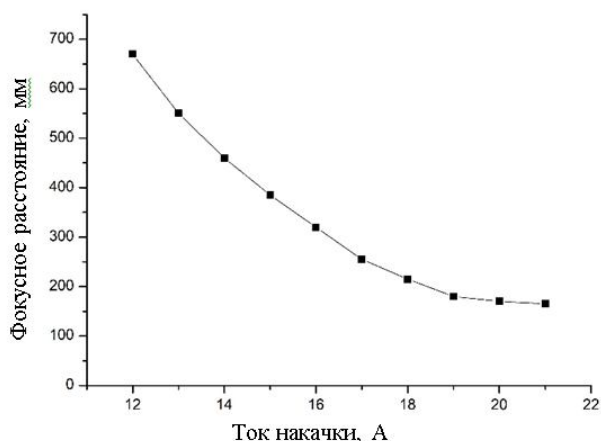


Рис. 1. Фокусное расстояние термолинзы в активной среде квантрона при различных токах накачки

Оптическая схема резонатора для экспериментальных исследований показана на рис. 2. Так же как и в [6], в качестве выходного зеркала лазера использовался стабилизированный равноплечный интерферометр Майкельсона, в котором планируется располагать ЭОМ для реализации режима УКИ.

Варьируемыми параметрами резонатора были:

- фокусные расстояния корректирующих линз Л1 и Л2 (F_1, F_2);
- фокусное расстояние наведенной в АС термолинзы F_3 (см. рис. 1);
- расстояние между линзами L_1 (положение линзы Л1 фиксировалось).

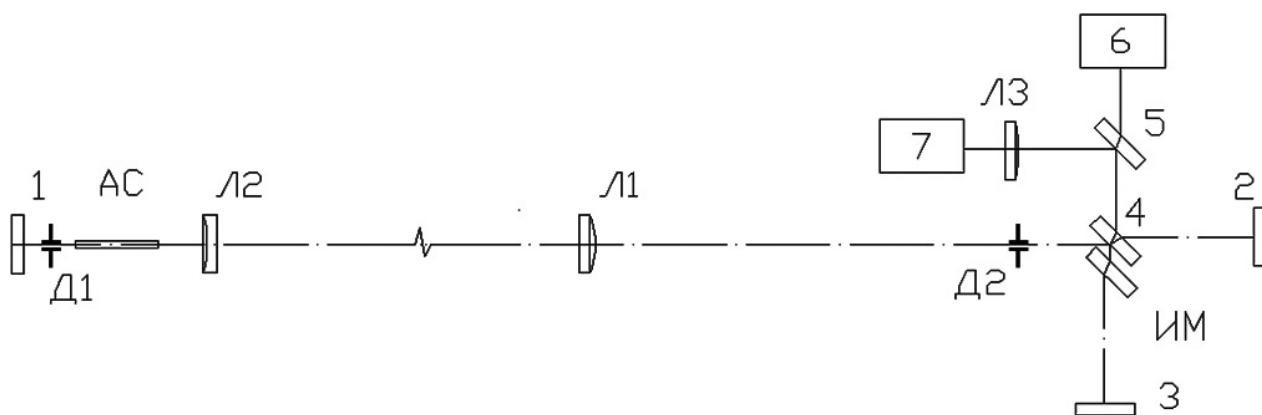


Рис. 2. Оптическая схема экспериментов

1–3 — плоские зеркала $R = 99.5\%$; 4 — 50% светоделитель ИМ и компенсатор; 5 — ответвитель; 6 — измеритель мощности 3А-Р с монитором VEGA (Ophir, Израиль); 7 — анализатор распределения интенсивности пучка LaserBeamProfiler (LLG, Германия); Д1, Д2 — диафрагмы $\varnothing 2.5$ мм; Л1–Л3 — линзы; АС — активная среда

Методика численной оптимизации резонатора рассматривается в части 2 настоящей работы [8]. Для каждой тестируемой комбинации параметров в экспериментах измерялись выходная мощность и пространственная структура пучка выходного излучения, которые затем сравнивались с результатами теоретических расчетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Как показали эксперименты, наиболее критичным элементом в схеме компенсации термолинзы является отрицательная линза Л2 и место ее расположения относительно квантрона. По своей оптической силе отрицательная линза, как правило, лишь немного уступала положительной линзе, наведенной в квантроне, и почти компенсировала ее, однако в отсутствие второй корректирующей линзы Л1 генерация в длинном резонаторе была невозможной.

По результатам измерения формы пятна и мощности выходного излучения для тока накачки 20.5 А и соответствующего ему фокусу термолинзы $F_3 = 170$ мм (см. рис. 1) близкими к оптимальному оказались: фокусное расстояние отрицательной линзы $F_2 = -100$ мм, фокусное расстояние положительной линзы $F_1 = 1000$ мм при расстоянии между линзами $L_1 = 870$ мм (расстояние от линзы Л2 до центра квантрона 80 мм).

На рис. 3 (а–в) показаны формы пятен выходного излучения при изменении фокуса линзы от $F_2 = -100$ мм (б) в меньшую и в большую стороны для фиксированного расстояния L_1 ; а на рис. 3 (г–е) — для фиксированной линзы при ее небольших передвижениях от $L_1 = 870$ мм (д) вперед и назад.

Видно, что даже небольшие отклонения параметров резко ухудшают пространственные характеристики выходного излучения. Результаты, показанные на рис. 3, получены при максимальном токе диодов накачки квантрона, равном 20.5 А.

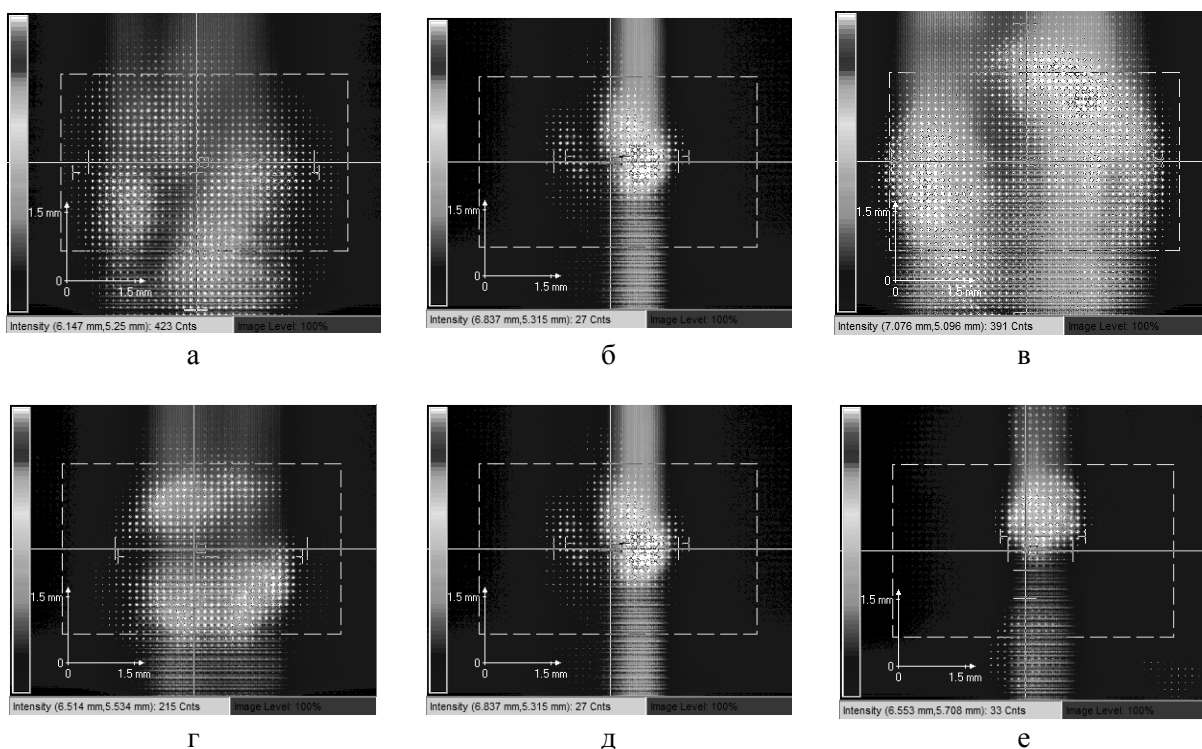


Рис. 3. Форма пятен выходного излучения.

Условия для (а–в): $L_1 = 870$ мм (а, б, в) и $F_2 = -125$ (а), -100 (б), -85 мм (в); условия для (г–е): $L_1 = 865$ (г), 870 (д), 875 мм (е) и $F_2 = -100$ мм (г, д, е)

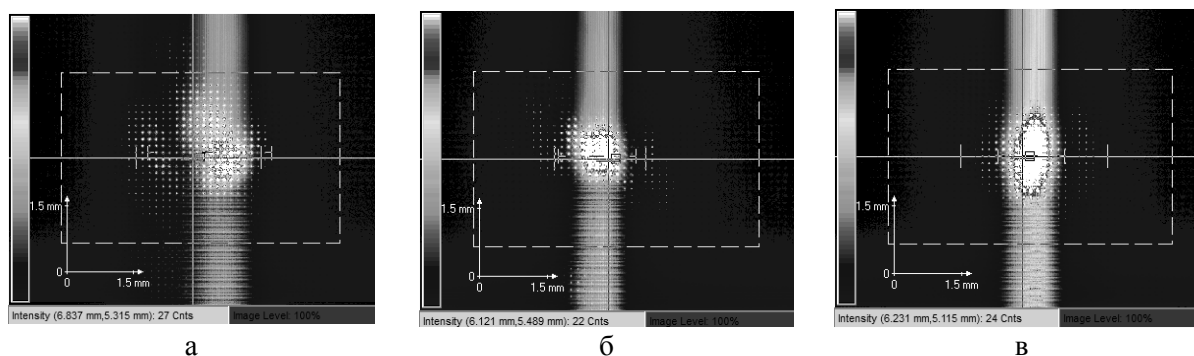


Рис. 4. Форма пятен выходного излучения.

Условия: $F_1 = 1000$ (а), 1200 (б) и 1300 мм (в), $L_1 = 870$, $F_2 = -100$ мм, ток накачки 20.5 А

При этом из рис. 1 фокусное расстояние термлинзы может быть оценено как $F_3 = 170$ мм. Наибольшая выходная мощность составляла 5 Вт и достигалась в режиме генерации нескольких поперечных мод (см. рис. 3, в). В оптимальном режиме генерации, где форма пятна была близка к гауссовой (рис. 3, б, д), мощность была примерно вдвое меньше. Уменьшение тока накачки от 20.5 до 18.5 А при оптимальных параметрах коррекции для 20.5 А сопровождалось снижением выходной мощности, но форма пятна сохранялась неизменной.

Фокусное расстояние положительной линзы $F_1 = 1000$ мм в ситуациях, показанных на рис. 3, сохранялось неизменным. Увеличение фокусного расстояния линзы Л1 до 1200 мм, как показано на рис. 4, а, б, слабо влияло на форму пятна, но при $F_1 = 1300$ мм (в) симметричного круглого пятна получить не удалось, хотя мощность генерации при этом несколько возрастала. Линза Л1 с фокусом 1200 мм была принята в качестве оптимального варианта корректировки.

ВЫВОДЫ

В заключение отметим, что в данной серии из двух работ приведена методика численной оптимизации конфигурации резонатора твердотельного лазера, построенного на базе серийного квантрона с компенсацией термлинзы, и ее экспериментальная верификация. Компенсация осуществляется путем введения в резонатор отрицательной и положительной корректирующих линз, в результате чего появляется возможность получить в резонаторе длиной 1500 мм выходное излучение в виде гауссова пучка с малой угловой расходимостью, пригодного для научных исследований, в частности для реализации режима генерации УКИ лазерного излучения.

Методика численной оптимизации носит универсальный характер и позволяет рассчитать фокусные расстояния корректирующих линз и их местоположение в резонаторе по известным параметрам тепловой линзы в применяемом квантроне и заданным размеру сечения и угловой расходимости выходного лазерного пучка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 075-00913-21-01 "Методы управления параметрами излучения твердотельного лазера с помощью переключаемого интерферометра Майкельсона".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Products Cutting Edge Optronics [site]. URL: <https://cuttingedgeoptronics.com/laser-gain-modules/>
2. High power diode lasers & DPSS lasers [site]. URL: <http://www.sino-laser.com/dpssamplifier.html>
3. Гречин С.Г., Николаев П.П. Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 1. С. 1–17. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23451700>
4. Глухих И.В., Димаков С.А., Курунов Р.Ф., Поликарпов С.С., Фролов С.В. Мощные твердотельные лазеры на Nd:YAG с поперечной диодной накачкой и улучшенным качеством излучения // Журнал технической физики. 2011. Т. 81, вып. 8. С. 70–75. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/10386>
5. Вдовин Г.В., Четкин С.А. Активная коррекция тепловой линзы твердотельного лазера. II. Использование резонатора управляемой конфигурации // Квантовая электроника. 1993. Т. 20, № 2. С. 167–171. URL: <http://mi.mathnet.ru/qe2958>
6. Грязнов Н.А., Соснов Е.Н., Горячкин Д.А., Никитина В.М., Родионов А.Ю. Активная фазовая синхронизация мод в резонаторе с управляемым интерферометром Майкельсона // Оптический журнал. 2019. Т. 86, № 4. С. 3–10. URL: <http://opticjourn.ru/vipuski/1836-opticheskij-zhumal-tom-86-04-2019.html>

7. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В., Яковин М.Д. Новый метод модуляции добротности резонатора с синхронизацией мод в твердотельных лазерах // Оптический журнал. 2018. Т. 85, № 4. С. 8–11. URL: <http://opticjourn.ru/vipuski/1679-opticheskij-zhurnal-tom-85-04-2018.html>
8. Родионов А.Ю., Горячкин Д.А., Соснов Е.Н., Купренюк В.И. Твердотельный лазер для научных исследований с коррекцией тепловой линзы в резонаторе. II. Методика и результаты численных расчетов // Научное приборостроение. 2022. Т. 32, № 1. С. 56–67. URL: <http://iairas.ru/mag/2022/full1/Art6.pdf>

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург

Контакты: Горячкин Дмитрий Алексеевич,
d.goryachkin@rtc.ru

Материал поступил в редакцию 17.11.2021

SOLID STATE LASER FOR SCIENTIFIC INVESTIGATIONS WITH COMPENSATION OF A THERMAL LENS IN THE CAVITY. I. EXPERIMENTAL RESULTS

D. A. Goryachkin, A. Yu. Rodionov, E. N. Sosnov, V. I. Kuprenyuk

The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint Petersburg, Russia

The most important parameters of a solid state laser for scientific and technological applications are the high brightness and small angular divergence of the output emission. This series of two papers highlights the method of numerical optimization of the laser resonator based on a commercial head with compensation of the induced thermal lens. Experimental verification of the method was carried out. In a 1500 mm long resonator, compensation is achieved by inserting negative and positive correcting lenses into the resonator, resulting in output emission in the form of a Gaussian beam with a small angular divergence, suitable for scientific research.

Keywords: laserhead, induced thermal lens, Gaussian beam, correcting lens, aperture diaphragm

INTRODUCTION

At present, the simplest way to create a solid-state laser for scientific research is to use a base element mass-produced by a number of companies (see, for example, [1, 2]), the so-called laser headpiece, with the required output power level. Modern laser heads are compact modules of an optimized design containing an active medium, as a rule, based on an Nd:YAG rod, as well as a transverse diode pumping system with built-in elements of a liquid cooling system. There is also a wide variety of pump diodes and cooling power supplies available to match the laser headpiece type. The researcher, as a rule, has only to develop a laser resonator, the composition and parameters of which are determined by the requirements for the output laser emission, which are set in response to the need to solve a specific research problem.

A characteristic feature of all solid-state laser heads with transverse diode pumping is the presence of an induced positive thermal lens [2, 3], the optical power of which depends on the pump current. For this reason, the output power of commercial devices is usually calibrated by the manufacturer using the simplest two-mirror plane resonator with a length of several tens of centimeters.

It is clear that the angular divergence of laser emission (optical quality) with such a resonator cannot be small, preventing its use in most scientific and technological applications. There are known methods for compensating a thermal lens in an active medium and improving the quality of output emission using, for example, an unstable resonator [4] or a resonator with a dynamically deformed rear mirror [5].

It's worth noting that the resonator length remains relatively short in this case, despite the fact that this parameter is critical in a variety of applications. For

example, when the mode of generation of ultrashort pulses (USPs) is realized through the method of active synchronization of longitudinal modes [6, 7], the number of these modes, and thus the length of the resonator, should be sufficient, and the intermode interval, which determines the requirements for the frequency of operation of the electro-optical modulator (EOM), should not be too big. So, with a resonator length of $L = 1500$ mm, the intermode spacing is 100 MHz, allowing us to meet the EOM driver speed requirement and generate subnanosecond pulses in our study [6].

In our work [6], we reported on the possibility of compensating the thermal lens in the GN-50 laser head [2] when introducing two lenses into a resonator with a Michelson interferometer (IM) 1500 mm long, however, the pump current was strictly fixed, and the laser output power did not exceed 0.5 W.

This series of two studies (see also [8]) presents the results of experimental research and calculation of the structure of transverse modes of the resonator [6], the focus optimization and places of installation of correcting lenses to obtain the lasing regime on one lowest mode with the widest possible mode aperture in the active rod. At an output power level of up to 5 W output emission with an intensity distribution close to Gaussian was obtained. In this case, the developed scheme was characterized by low sensitivity to changes in the pump current of laser diodes in the region of high currents, which are of the greatest interest in practice.

EXPERIMENTAL TECHNIQUE

When constructing an optical resonator with flat mirrors 1500 mm long on a laser headpiece with

transverse diode pumping, it is necessary to compensate for the effect of a positive thermal lens, the optical power of which depends on the pump current. The resonator becomes unstable in the presence of a thermal lens, and lasing stops if the focal length of the induced thermal lens matches or slightly exceeds the length of the resonator.

Results of experimental measurements of the focal length of a thermal lens induced in a GN-50 laser headpiece (in terms of use of a spherical lens) are obtained for the visible emission of a helium-neon laser as a function of the pump diode current and are shown in Fig. 1.

Fig. 1. The focal length of the thermal lens in the active medium of the laser head at various pump currents

The optical layout of the resonator for experimental studies is shown in Fig. 2. Just as in [6], a stabilized equal-arm Michelson interferometer was used as the output mirror of the laser. An EOM was planned to be located in an interferometer to implement the USP regime.

Fig. 2. Optical layout of experiments.

1–3 — flat mirrors $R = 99.5\%$; 4 — 50% IM beam splitter and compensator; 5 — coupler; 6 — power meter 3A-P with VEGA monitor (Ophir, Israel); 7 — analyzer of beam intensity distribution LaserBeamProfiler (LLG, Germany); Д1, Д2 — diaphragms $\varnothing 2.5$ mm; Л1–Л3 — lenses; АС — active emission

The varied parameters of the resonator were:

- the focal lengths of corrective lenses Л1 and Л2 (F_1, F_2);
- the focal length of the thermolens F_3 induced in the active medium (see Fig. 1);
- the distance between the lenses L_1 (the position of the lens Л1 was fixed).

The technique of numerical optimization of the resonator is considered in part 2 of this study [8]. Each tested pair of parameters, including the output power and the spatial structure of the output emission beam, was measured to be compared with the results of theoretical calculations.

EXPERIMENTAL RESULTS

Experiments have shown that the most critical element in the thermal lens compensation scheme is the Л2 negative lens and its location relative to the laser head. In terms of its optical power, the negative

lens, as a rule, was only slightly inferior to the positive lens, induced in the laser head, and almost compensated for it. However, if the second correcting lens Л1 lacked, generation in the long resonator was impossible.

Fig. 3. The shape of the spots of the output emission.

Conditions for (а–в):

$L_1 = 870$ mm (а, б, в), $F_2 = -125$ (а), -100 (б), -85 mm (в);

conditions for (г–е):

$L_1 = 865$ (г), 870 (д), 875 mm (е) и $F_2 = -100$ mm (г, д, е)

According to the measurement of the spot shape and the power of the output emission of a pump current of 20.5 A and the corresponding focus of the thermal lens $F_3 = 170$ mm (see Fig. 1), the following parameters turned out to be nearly optimal: the focal length of the negative lens $F_2 = -100$ mm, the focal length of the positive lens $F_1 = 1000$ mm with the distance between the lenses $L_1 = 870$ mm (the distance from lens Л2 to the center of the laser head is 80 mm).

Fig. 3 (а–в) shows the shapes of the output emission spots when the lens focus changes from $F_2 = -100$ mm (б) up and down for a fixed distance L_1 ; and in Fig. 3 (г–е) — for a fixed lens with its small movements from $L_1 = 870$ mm (д) forward and back.

It can be seen that even small deviations in the parameters sharply worsen the spatial characteristics of the output emission. The results shown in Fig. 3 were obtained at the maximum current of the pump diodes of the laser head equal to 20.5 A.

Fig. 1 shows that the focal length of the thermal lens can be estimated as $F_3 = 170$ mm. The highest output power was 5 W and was achieved in the regime of the generation of several transverse modes (see Fig. 3, в). In the optimal generation regime, when the spot shape was close to Gaussian (Fig. 3, б, д), the power was approximately half that. Reducing the pump current from 20.5 to 18.5 A with the optimal correction parameters for 20.5 A was accompanied by a decrease in the output power, but the shape of the spot remained unchanged.

The focal length of the positive lens $F_1 = 1000$ mm remained unchanged in the cases shown in Fig. 3. Increasing the focal length of the lens Л1 to 1200 mm, as shown in Fig. 4, а, б, had little effect on the shape of the spot. However, at $F_1 = 1300$ mm (в), a symmetric circular spot could not be obtained, although the generation power slightly increased in this case. Lens Л1 with a focus of 1200 mm was adopted as the optimal correction option.

Fig. 4. The shape of the spots of the output emission. Conditions: $F_1 = 1000$ (a), 1200 (б) and 1300 mm (в), $L_1 = 870$, $F_2 = -100$ mm, pump current 20.5 A

CONCLUSIONS

Finally, we note that in this series of two studies, a technique for the numerical optimization of the resonator configuration of a solid-state laser built on the basis of a serial laser head with thermal lens compensation and its experimental verification are presented. Compensation is carried out by introducing negative and positive corrective lenses into the resonator, as a result of which it becomes possible to obtain output emission in a resonator with a length of 1500 mm in the form of a Gaussian beam with a small angular divergence, suitable for scientific research, in particular for the implementation of the generation of USP of laser emission.

The numerical optimization technique is universal in nature allowing the focal lengths of the correcting lenses and their location in the resonator to be calculated using the known parameters of the thermal lens in the laser head in use and the given cross-sectional size and angular divergence of the output laser beam.

REFERENCES

1. *Products Cutting Edge Optronics* [site]. URL: <https://cuttingedgeoptronics.com/laser-gain-modules/>
2. *High power diode lasers & DPSS lasers* [site]. URL: <http://www.sino-laser.com/dpssamplifier.html>
3. Grechin S.G., Nikolaev P.P. [Quantum solid state lasers with transverse semiconductor pumping]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum electronics], 2009, vol. 39, no. 1, pp. 1–17. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23451700> (In Russ.).
4. Gluchich I.V., Dimakov S.A., Kurunov R.F., Polikarpov S.S., Frolov S.V. [Powerful solid state lasers on Nd: YAG with transverse diode pumping and improved radiation quality]. *Zhurnal technicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2011, vol. 81, is. 8, pp. 70–75. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/10386> (In Russ.).
5. Vdovin G.V., Chetkin S.A. [Active correction of solid-state laser thermal lens. II. Using a Controlled Configuration Resonator]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum electronics], 1993, vol. 20, no. 2, pp. 167–171. URL: <http://mi.mathnet.ru/qe2958> (In Russ.).
6. Gryaznov N.A., Sosnov E.N., Goryachkin D.A., Nikitina V.M., Rodionov A.Yu. [Active phase synchronization of modes in a resonator with a Michelson interferometer]. *Opticheskiy zhurnal* [Optical magazine], 2019, vol. 86, no. 4, pp. 3–10. (In Russ.). URL: <http://opticjourn.ru/vipuski/1836-opticheskiy-zhurnal-tom-86-04-2019.html>
7. Donin V.I., Yakovin D.V., Gribanov A.V., Yakovin M.D. [New method of Q-switching with mode locking in solid-state lasers]. *Opticheskiy zhurnal* [Optical magazine], 2018, vol. 85, no. 4, pp. 8–11. (In Russ.). URL: <http://opticjourn.ru/vipuski/1679-opticheskiy-zhurnal-tom-85-04-2018.html>
8. Rodionov A.Yu., Goryachkin D.A., Sosnov E.N., Kuprenyuk V.I. [Solid state laser for scientific investigations with compensation of a thermal lens in the cavity. II. Method and results of numerical calculations]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2022, vol. 32, no. 1, pp. 56–67. DOI: 10.18358/np-32-1-i5667 (In Russ.).

Contacts: *Goryachkin Dmitry Alekseevich*,
d.goryachkin@rtc.ru

Article received by the editorial office on 17.11.2021