

## Расчет формирующей оптической системы технологического оборудования на базе мощного волоконного лазера

П. А. Носов,\* А. О. Щадько†

*МГТУ имени Н.Э.Баумана, кафедра лазерных и оптико-электронных систем*

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

*(Статья поступила 25.07.2017; Подписана в печать 16.10.2017)*

Рассмотрены особенности функционирования оптических систем технологического оборудования на базе мощных волоконных лазеров. Экспериментальные результаты показали, что распределение плотности мощности лазерного излучения и распределение температуры на оптическом элементе лазерной головки имеют один и тот же характер и могут быть аппроксимированы функцией Гаусса. Приведены результаты экспериментальных исследований нагрева оптических элементов из высокочистого кварцевого стекла российского производства марки КС-4В при формировании излучения мощного волоконного лазера непрерывного режима. Определена максимальная температура нагрева оптических элементов при различных плотностях мощности лазерного излучения. Приведены выражения для анализа термооптических искажений пучка на выходе оптической системы лазерного оборудования для технологических процессов обработки материалов. Анализ рассчитанных оптических систем показал, что из-за нагрева линз из кварцевого стекла под действием мощного лазерного излучения выходная перетяжка смещается ближе к защитному стеклу, а её диаметр практически не изменяется. Проведенные исследования показывают необходимость учета нагрева линз при проектировании лазерной оптики для современного технологического оборудования на базе мощных волоконных лазеров.

PACS: 42.55.Wd, 42.60.By, 42.62.Cf. УДК: 535.317.

Ключевые слова: лазерные технологии, оптические системы, волоконный лазер, силовая оптика, лучевая стойкость, лазерный пучок, перетяжка, фокусировка лазерного излучения.

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня по праву лазер относится к одной из главных технических инноваций XX века! Созданные в последнее время источники лазерного излучения и полученные знания о взаимодействии лазерного излучения с различными материалами привели к широкому применению лазеров в различных областях. Для реализации современных лазерных технологий обработки материалов используют различные типы лазеров. В последнее время активно развиваются лазеры с полупроводниковой накачкой, в т.ч. волоконные и дисковые [1–3].

Обзор отечественных и зарубежных лазерных технологических установок показал недостаточное понимание важной роли их оптического блока. Повышение производительности и технических характеристик технологических установок зачастую сводится лишь к увеличению мощности лазера и применению различных кинематических схем. Помимо роста стоимости, при увеличении мощности лазера ухудшается качество его излучения. В результате увеличивается энергопотребление и уменьшается КПД оборудования.

В настоящее время на рынке технологического оборудования значительную часть занимают установки на базе волоконных лазеров, для которых характерны высокие мощность и качество излучения, что поз-

воляет проводить производительную и точную обработку материалов. Основными элементами технологического оборудования являются источник излучения, система транспортировки излучения и формирующая оптическая система. Во всех лазерных технологиях (т.е. везде, где инструментом является лазерное излучение) лазерная оптическая система наряду с лазером — основные блоки, определяющие параметры данной технологии [4]!

При обработке материалов необходимо в рабочей зоне обеспечить требуемую плотность мощности лазерного излучения [1, 2]. Лучевая стойкость оптических элементов лазера, возникновение различных нелинейных эффектов и др. ограничивают максимальную выходную плотность мощности излучения. При этом мощные волоконные лазеры формируют расходящийся пучок. Для большинства технологических процессов, связанных с обработкой материалов, такие значения плотности мощности оказываются недостаточными. Поэтому при использовании лазерного излучения в технологических целях возникает необходимость его фокусировки.

Базовая компоновка формирующей оптической системы технологических установок на базе волоконных лазеров включает волоконный коннектор, коллиматор и фокусирующий узел, а также защитное стекло для предохранения оптики от загрязнения продуктами обработки материала [4]. Применение излучения высокой мощности влечет за собой поглощение и переход энергии лазерного излучения в тепло в элементах оптической системы. Последующие за нагревом процессы, такие как тепловые деформации и изменение показателя

\*E-mail: [pan@bmstu.ru](mailto:pan@bmstu.ru)

†E-mail: [schadko.ao@gmail.com](mailto:schadko.ao@gmail.com).

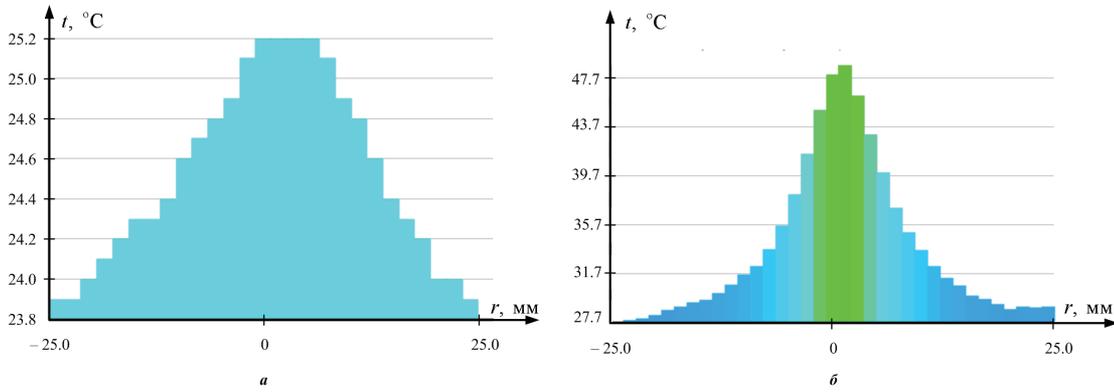


Рис. 1: Сечения распределений температуры  $t(r)$  на поверхности просветленного защитного стекла при воздействии излучения волоконного лазера различной плотности мощности в течение 2 мин.:  $a - P = 1$  кВт,  $D_{0.86} = 10$  мм;  $b - P = 3$  кВт,  $D_{0.86} = 6$  мм ( $P$  – мощность лазера,  $D_{0.86}$  – диаметр лазерного пучка по уровню 0.86 от полного потока)

преломления материала оптических элементов, приводят к возникновению тепловой линзы [5, 6] – изменению оптической силы каждого узла и всей оптической системы и, как следствие, отклонению заданных пространственных параметров пучка в зоне обработки. В конечном итоге, все это приводит к несоблюдению параметров технологического процесса.

Поскольку лазерные технологические установки для современных процессов обработки материалов должны обеспечивать высокое качество формируемого в зоне обработки пучка, то при их разработке особое внимание должно быть уделено анализу aberrаций оптической системы.

### 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТОВ

В результате экспериментальных исследований нагрева оптических элементов из кварцевого стекла КС-4В при воздействии излучения непрерывного волоконного лазера различной плотности мощности получены следующие результаты. Для защитного стекла без просветляющего покрытия при плотности мощности излучения  $0.64$  кВт/см<sup>2</sup> максимальный нагрев зарегистрирован в центре защитного стекла. При такой плотности мощности излучения изменение температуры защитного стекла составило всего несколько градусов. В то же время, для защитного стекла с лучстойким просветляющим покрытием при плотности мощности излучения  $10.6$  кВт/см<sup>2</sup> защитное стекло нагрелось на  $27.8^\circ\text{C}$  [7]. Проведенные исследования показали, что распределение плотности мощности лазерного излучения и распределение температуры на оптическом элементе лазерной головки имеют один и тот же характер и могут быть аппроксимированы функцией Гаусса (рис. 1).

Исследования пространственной структуры пучка мощного волоконного лазера [4] показали, что она аналогична структуре гауссова пучка и описывается набором параметров, в основе которого лежат конфокальный параметр пучка  $z_k$  и параметр  $BPP$ . Причем эти

параметры взаимосвязаны и удовлетворяют инварианту лазерного пучка:  $BPP = h_p \theta = h_p^2 / z_k = M^2 \lambda / \pi$ , где  $h_p$  – размер (полудиаметр) перетяжки,  $2\theta$  – угловая расходимость пучка,  $M^2$  – параметр качества пучка,  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

Методы aberrационного анализа и синтеза лазерных оптических систем с малыми волновыми aberrациями разработаны в работах [8–10]. Рассмотрим некоторые вопросы расчета лазерных оптических систем с малыми термооптическими искажениями формируемого пучка. Провести приближенный анализ лазерной оптической системы и рассчитать пространственные параметры формируемого лазерного пучка с учетом нагрева линз позволяют следующие выражения [11]:

$$D'_p = D_p \sqrt{\tilde{\alpha}_\Gamma},$$

$$s'_p = (\Phi + \Delta\Phi)^{-1} - [(\Phi + \Delta\Phi)^{-1} + s_p] \tilde{\alpha}_\Gamma,$$

$$z'_k = z_k \tilde{\alpha}_\Gamma, \quad 2\theta' = \frac{2\theta}{\sqrt{\tilde{\alpha}_\Gamma}},$$

$$\tilde{\alpha}_\Gamma = \frac{\alpha_\Gamma}{1 - [2s_p(\Phi R_\Phi - 1)\Delta\Phi + s_p R_\Phi \Delta\Phi^2] \alpha_\Gamma},$$

$$\alpha_\Gamma = \frac{1}{(1 + \Phi s_p)^2 + (\Phi z_k)^2}.$$

Здесь  $D_p$  и  $D'_p$  – диаметр перетяжки до и после преобразования соответственно;  $s_p$  и  $s'_p$  – отрезки, определяющие положение перетяжки исходного и преобразованного пучка относительно линзы (согласно правилу знаков, принятому в оптике);  $z_k$  – параметр конфокальности входного пучка;  $z'_k$  – параметр конфокальности преобразованного линзой пучка;  $2\theta$  и  $2\theta'$  – угловая расходимость входного и преобразованного пучков соответственно;  $\Delta\Phi$  – изменение оптической силы линзы за счет ее нагрева под действием мощного лазерного излучения;  $\tilde{\alpha}_\Gamma$  – продольное увеличение линзы, учитывающее изменение оптической силы линзы на величину  $\Delta\Phi$  за счет ее нагрева под действием мощного лазерного излучения;  $\alpha_\Gamma$  – продольное увеличение линзы при  $\Delta\Phi = 0$ ;

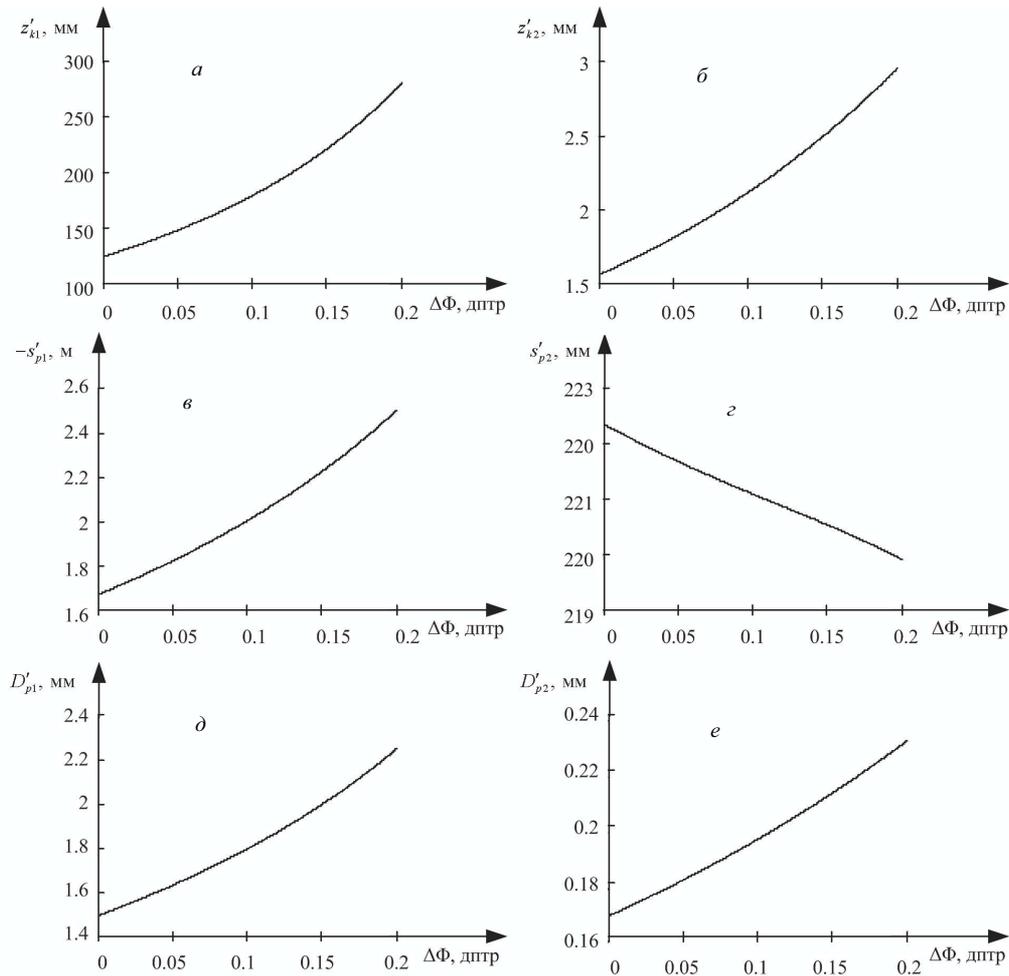


Рис. 2: Зависимости параметра конфокальности  $z'_k$ , положения перетяжки  $s'_p$  и диаметра перетяжки  $D'_p$  на выходе оптической системы от оптической силы наведенной тепловой линзы  $\Delta\Phi$  (в индексе параметров пучка использованы обозначения: «1» — коллимирующая линза, «2» — фокусирующая линза)

$R_\Phi = -(s_p^2 + z_k^2) / s_p$  — радиус кривизны волнового фронта гауссова пучка на линзе (согласно правилу знаков, принятому в лазерной оптике).

Анализ формирующих оптических систем, изготовленных из кварцевого стекла, показал, что дефокусировка выходной перетяжки может достигать нескольких конфокальных параметров выходного пучка при мощности непрерывного волоконного лазера 4...5 кВт, но является незначительной при мощности излучения меньше 1 кВт.

Рассмотрим в качестве примера анализ оптической системы, формирующей излучение мощного волоконного иттербиевого лазера непрерывного режима ( $\lambda = 1.07$  мкм, диаметр волокна 50 мкм, параметр  $BPP = 4.5$  мм·мрад, максимальная мощность 5 кВт). Оптическая система имеет следующие параметры (линзы оптической системы считаем «тонкими»): расстояние от входной перетяжки до коллимирующей линзы — 112.0 мм, фокусное расстояние коллимирующей и фокусирующей линз равны 120.0 мм

и 200.0 мм, расстояние между линзами — 310.0 мм, диаметр линз 2", материал линз — кварцевое стекло.

На рис. 2 представлены зависимости параметра конфокальности, положения перетяжки и диаметра перетяжки на выходе оптической системы от оптической силы наведенной тепловой линзы. Из графиков видно существенное влияние нагрева линз формирующей оптической системы на параметры пучка в зоне обработки материала. Полученные результаты согласуются с практическими данными [12], согласно которым для линз оптической системы из кварцевого стекла за счет их нагрева выходная перетяжка смещается ближе к фокусирующей линзе, причем ее размер практически не изменяется. Влияние этого эффекта можно снизить за счет использования линз из стекла с меньшим температурным коэффициентом показателя преломления и большим коэффициентом теплопроводности, а также охлаждения оптических элементов лазерной технологической головки [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты исследований и рассмотренные подходы к расчету формирующих оптических систем лазерных технологических установок позволяют проводить их расчет для обеспечения малых аберрационных искажений при формировании пучка мощного волоконного лазера.

Экспериментальные исследования показали, что под действием мощного лазерного излучения температу-

ра оптического элемента определяется распределением плотности мощности излучения на нем, причем в центральной части распределение температуры полностью соответствует распределению плотности мощности излучения, а в периферийной части наблюдаются отклонения, вызванные эффектом теплопередачи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00936 а.

- 
- [1] Вакс Е. Д., Миленький М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013.
- [2] Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А. Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
- [3] Mahrle A., Veyer E. J. of Phys. D.: Appl. Phys. 2009. **42**, N 17. art. N 175507.
- [4] Ширанков А. Ф., Носов П. А., Григорьянц А. Г., Третьяков Р. С., Самарин П. Е. Научные технологии в машиностроении. 2014. № 5. С. 37.
- [5] Blomster O., Pelsson M., Roos S.-O. Proc. SPIE 6871, Solid State Lasers XVII: Technology and Devices. 2008. **6871**. art. no. 68712B.
- [6] Scaggs M., Haas G. Thermal lensing compensation objective for high power lasers. 29-th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2010 - Congress Proceedings. 2010. **103**. P. 1511.
- [7] Носов П. А., Ширанков А. Ф., Третьяков Р. С., Григорьянц А. Г., Ставертий А. Я. Изв. вузов. Приборостроение. 2016. **59**, № 12. С. 1028.
- [8] Пахомов И. И., Цибуля А. Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. М.: Радио и связь, 1986.
- [9] Пахомов И. И., Ширанков А. Ф., Носов П. А. Оптический журнал. 2010. **77**, № 2. С. 37.
- [10] Носов П. А., Павлов В. Ю., Пахомов И. И., Ширанков А. Ф. Оптический журнал. 2011. **78**, № 9. С. 34.
- [11] Носов П. А. Прикладная физика. 2017. № 2. С. 87.
- [12] Harrop N., Wolf S., Maerten O., Dudek K., Ballach S., Kramer R. Absorption driven focus shift. Proc. SPIE. High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications. 2016. **9741**. art. N97410P.

---

## Calculation of the optical system for process equipment on the basis of high-power fiber laser

P. A. Nosov<sup>a</sup>, A. O. Shchadko<sup>b</sup>

Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University. Moscow 105005, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>pan@bmstu.ru, <sup>b</sup>schadko.ao@gmail.com

Features of functioning of optical systems of the process equipment on the basis of powerful fiber lasers are considered. The experimental results show that the distribution of the power density of the laser radiation and the temperature distribution on the optical element of the laser head can be approximated by the Gaussian function. The results of experimental studies of the heating of optical elements from high-purity quartz glass of the Russian production of the grade KS-4V are presented in the formation of radiation from a CW high-power fiber laser. The maximum heating temperature of optical elements at various laser power densities are determined. Expressions are given for analyzing the thermal-optical distortions of the beam at the output of the optical system of laser equipment for technological processes of material processing. Analysis of the optical systems calculated has shown that when heating of lenses made of quartz glass under the influence of high-power laser radiation, the output waist is shifted closer to the protective glass, and its diameter remains practically unchanged. The researches show that when designing of laser optics for the modern technological equipment on the basis of powerful fiber lasers the account of heating of lenses is very important.

PACS: 42.55.Wd, 42.60.By, 42.62.Cf.

*Keywords:* laser technologies, optical systems, fiber laser, power optics, radiation resistance, laser beam, waist beam, focusing of laser radiation.

*Received 25 July 2017.*

### Сведения об авторах

1. Носов Павел Анатольевич — канд. техн. наук, доцент; тел. (499) 263-62-38, e-mail: pan@bmstu.ru. .
2. Щадько Александр Олегович — студент; e-mail: schadko.ao@gmail.com.