

Термооптический анализ формирующих систем мощных волоконных лазеров

П. А. Носов

Рассмотрены особенности функционирования оптических систем, формирующих пучок излучения мощных волоконных лазеров. Приведена формула для расчёта изменения фокусного расстояния линз формирующей оптической системы за счёт их нагрева. Получены приближённые выражения для термооптического анализа лазерных оптических систем, позволяющие рассчитать пространственные параметры формируемого лазерного пучка (диаметр перетяжки, положение перетяжки, параметр конфокальности, угловая расходимость) и фактор фокального сдвига FSF. Предложен способ компенсации отклонения пространственных параметров пучка в зоне обработки материала, вызванные нагревом линз формирующей оптической системы. Рассмотрен пример анализа лазерной оптической системы.

Ключевые слова: лазерная оптика, лазерный пучок, мощный волоконный лазер, оптическая система, термоабберации, лазерные технологии.

Введение

В настоящее время лидирующую позицию на рынке технологического оборудования занимают установки на базе волоконных лазеров, для которых характерны высокие мощность и качество излучения, что позволяет проводить производительную и прецизионную обработку материалов [1–4]. Для обеспечения требуемой плотности мощности излучения в зоне обработки материала пучок на выходе транспортировочного волокна преобразуется оптической системой. При этом из-за высокой мощности лазера имеет место поглощение лазерного излучения в элементах оптической системы и их нагрев. Последующие за нагревом процессы, такие как деформация и изменение показателя преломления материала оптических элементов, вызывают изменение оптических характеристик системы и отклонение от требуемых пространственных параметров пучка в зоне обработки материала. В конечном итоге всё это приводит к несоблюдению параметров технологического процесса [5–9].

Таким образом, при разработке современного лазерного технологического оборудования требуется проводить термооптический анализ формирующей системы и рассчитывать отклонение параметров пучка в рабочей зоне из-за нагрева её элементов. Точное теоретическое рассмотрение этой задачи является достаточно трудоёмким и требует разработки модели такого процесса и её решения, причём только численно. Однако при разумных допущениях решение такой задачи существенно упрощается, что позволяет получить приближённые аналитические выражения для проведения оценочного расчёта.

Целью данной работы являлось получение приближённых выражений для термооптического анализа лазерных оптических систем, позволяющих рассчитать пространственные параметры формируемого лазерного пучка (диаметр перетяжки, положение перетяжки, параметр конфокальности, угловая расходимость) и фактор фокального сдвига.

Получение основных соотношений

Оптическая система лазерного оборудования на базе волоконного лазера включает узел коллиматора, узел фокусировки и защитное стекло (см. рис. 1) [10].

Носов Павел Анатольевич, доцент, к.т.н.
МГТУ им. Н. Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел. (499) 263-65-93. E-mail: pan@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2016 г.

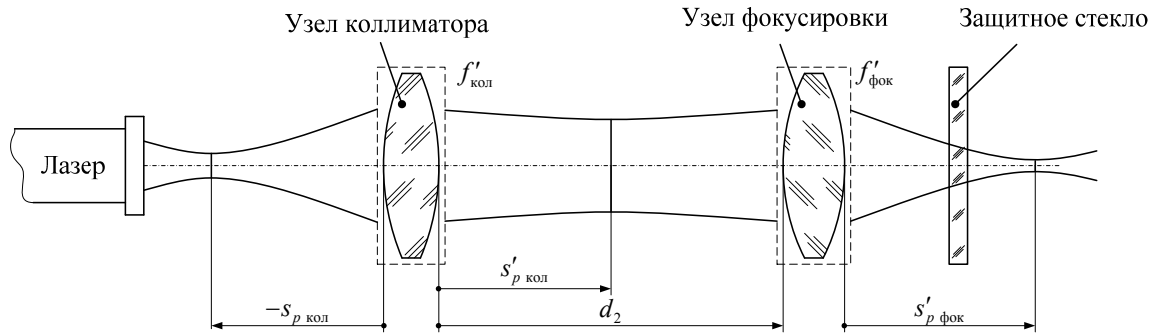


Рис. 1. Структурная схема оптической системы формирования пучка волоконного лазера: f' – фокусное расстояние узла; s_p и s'_p – положение перетяжки входного и выходного пучка (согласно принятому в оптике правилу знаков); d_2 – расстояние вдоль оптической оси от последней поверхности узла коллиматора до первой поверхности узла фокусировки.

В работах [6, 11] получена формула, позволяющая рассчитать изменение оптической силы линзы $\Delta\Phi$ при её нагреве на ΔT :

$$\Delta\Phi = \left(\frac{dn/dT}{n-1} - \alpha \right) \Phi \Delta T. \quad (1)$$

Здесь Φ – номинальное значение оптической силы линзы; α – коэффициент температурного расширения стекла; dn/dT – температурный коэффициент показателя преломления стекла; n – показатель преломления стекла на рабочей длине волны излучения лазера.

В другой работе [7] приводится следующая формула для расчёта изменения фокусного расстояния линзы Δf из-за её нагрева:

$$\Delta f = P_{abs} \frac{dn/dT}{2\pi k} \left(\frac{f'}{R_L} \right)^2, \quad (2)$$

где P_{abs} – мощность поглощенного в линзе лазерного излучения; k – коэффициент теплопроводности стекла; f' – номинальное фокусное расстояние линзы R_L – радиус линзы.

Приведём формулы, позволяющие рассчитать изменение оптической силы линзы $\Delta\Phi$, соответствующее изменению её фокусного расстояния Δf , и наоборот:

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta f}{f'(f' + \Delta f)}, \quad \Delta f = \frac{\Delta\Phi f'^2}{1 - \Delta\Phi f'}.$$

Из анализа выражений (1) и (2) видно, что знак величины, на которую изменяется оптическая сила линзы формирующей лазерной оптической системы, определяется знаком коэффициента dn/dT .

Линзы оптической системы для формирования пучка излучения мощного волоконного лазера, как правило, изготавливают из высококачественного кварцевого стекла, теплофизические параметры которого имеют значения [6, 7]: $\alpha = 0,52 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{К}}$,

$$dn/dT = 10 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{К}}, \quad k = 1,38 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}.$$

Для того чтобы провести расчёт по формуле (1), необходимо знать изменение температуры оптических элементов за счёт их нагрева при формировании мощного лазерного излучения. В работе [12] приводятся экспериментальные данные нагрева элементов оптической системы, формирующей пучок излучения мощных волоконных лазеров непрерывного режима. Согласно данным этой работы, например, при плотности мощности лазерного излучения на оптическом элементе из высококачественного кварцевого стекла, равной $10,6 \text{ кВт/см}^2$, он нагревается на $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Для расчёта изменения фокусного расстояния линзы по формуле (2) эффективность поглощения лазерного излучения в оптических элементах из кварцевого стекла толщиной до 5 мм может быть принята равной 0,245 % [7].

Результаты исследования пространственной структуры пучка мощного волоконного лазера [4, 10, 13] показали, что она аналогична структуре гауссова пучка и описывается набором параметров, в основе которого лежат конфокальный параметр пучка z_k и параметр BPP . Причём 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 (полурадиус) перетяжки пучка, 2θ – угловая расходимость пучка, M^2 – параметр качества пучка, λ – длина волны лазерного излучения.

Для характеристики изменения положения выходной перетяжки из-за нагрева линз форми-

рующей оптической системы вводят фактор фокального сдвига (focal shift factor – FSF) [5]:

$$FSF = \frac{\Delta z'_p}{z'_k},$$

где $\Delta z'_p$ – смещение выходной перетяжки относительно её исходного (без учёта нагрева линз) положения; z'_k – конфокальный параметр выходного пучка.

Далее получим формулы, которые позволят рассчитать параметр FSF. Вывод формул проведём без учёта структуры узлов оптической системы (одиночная линза, многолинзовая система), рассматривая их в виде «тонких» линз.

Преобразование гауссова пучка идеальной (безабберационной) линзой описывается следующими формулами (см. рис. 2) [14]:

$$\begin{aligned} 2h'_p &= 2h_p \sqrt{\alpha_\Gamma}, \quad z'_p = -\alpha_\Gamma z_p, \quad z'_k = \alpha_\Gamma z_k, \\ 2\theta' &= \frac{2\theta}{\sqrt{\alpha_\Gamma}}, \quad \alpha_\Gamma = \frac{f'^2}{z_p^2 + z_k^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $2h_p$ и $2h'_p$ – диаметр перетяжки до и после преобразования соответственно; z_p и z'_p – отрезки, определяющие положение перетяжки исходного и преобразованного пучка относительно переднего (заднего) фокусов F (F') линзы; z_k – параметр конфокальности исходного пучка; z'_k – параметр конфокальности преобразованного линзой пучка; 2θ и $2\theta'$ – угловая расходимость исходного и преобразованного пучков соответственно; α_Γ – продольное увеличение линзы. Правило знаков для отрезков z_p и z'_p : вправо от фокусов – положительные, влево – отрицательные.

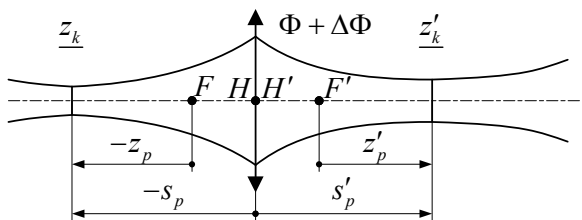


Рис. 2. К выводу формул: H, H' – главные точки линзы; F, F' – фокуса линзы

Выражение для продольного увеличения линзы нам удобно преобразовать к виду, в котором положение перетяжки преобразуемого пучка определяется не относительно переднего фокуса линзы, а относительно линзы:

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

Используя это выражение, можно получить соотношение для продольного увеличения линзы, учитывая изменение её оптической силы на $\Delta\Phi$ относительно номинального значения, а именно, имеем выражение:

$$\tilde{\alpha}_\Gamma = \frac{\alpha_\Gamma}{1 - [2s_p(\Phi R_\Phi - 1)\Delta\Phi + s_p R_\Phi \Delta\Phi^2] \alpha_\Gamma}, \quad (4)$$

где α_Γ – продольное увеличение линзы при $\Delta\Phi = 0$; $R_\Phi = -(s_p^2 + z_k^2)/s_p$ – радиус кривизны волнового фронта гауссова пучка на линзе (согласно правилу знаков, принятому в лазерной оптике).

Из анализа выражений (3) и (4) видно, что при нагреве линз оптической системы изменяются все пространственные параметры преобразованного пучка – диаметр перетяжки, её положение, параметр конфокальности и угловая расходимость пучка. При этом продольное увеличение коллимирующего узла из-за нагрева линз изменяется большим образом, чем фокусирующего узла.

Отклонение продольного увеличения линзы за счет нагрева уменьшается, если оптическая сила линзы $\Phi = 1/R_\Phi$ (см. формулу (4)). Отсюда можно определить необходимое положение входной перетяжки в виде следующего выражения:

$$s_p = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - (2z_k \Phi)^2}}{2\Phi}.$$

Последовательно рассматривая преобразование лазерного пучка каждым узлом оптической системы, полученные формулы позволяют рассчитать все пространственные параметры выходного пучка и параметр FSF.

Пример анализа конкретной оптической системы

Используя полученные расчетные соотношения, проведём анализ изменения параметров пучка на выходе оптической системы, формирующей излучение мощного волоконного иттербиевого лазера непрерывного режима ($\lambda = 1,07$ мкм, диаметр волокна 50 мкм, параметр $BPP = 2$ мм мрад, максимальная мощность 4 кВт [15]). Оптическая система имеет следующие параметры (все обозначения см. на рис. 1): расстояние от входной перетяжки до коллимирующего узла 84,7 мм, $f'_{\text{кол}} = 85$ мм, $f'_{\text{фок}} = 100$ мм, $d_2 = 190$ мм, диаметр линз 1,5", материал линз – кварцевое стекло.

Для рассматриваемого нами примера фокусные расстояния узлов формирующей оптической системы изменяются на 0,23 мм и 0,31 мм, что соответствует практически одинаковому изменению их оптической силы на 0,03 дптр.

Ниже в таблице представлены результаты расчёта параметров пучка на выходе рассматриваемой оптической системы.

Таблица

Результаты расчёта параметров пучка

Узел	Без учёта нагрева линз				При учёте нагрева линз				
	α_{Γ}	$2h'_p$, мм	z'_k , мм	s'_p , мм	$\tilde{\alpha}_{\Gamma}$	$2\tilde{h}'_p$, мм	\tilde{z}'_k , мм	\tilde{s}'_p , мм	FSF
Коллиматора	$3,7 \times 10^4$	9,61	$1,16 \times 10^4$	$-1,15 \times 10^4$	$6,81 \times 10^4$	13,04	$2,13 \times 10^4$	$-5,96 \times 10^3$	0,26
Фокусатора	$3,74 \times 10^{-5}$	0,06	0,43	100,43	$3,7 \cdot 10^{-5}$	0,08	0,79	99,91	0,66

Анализ результатов проведённого расчёта показал, что нагрев линз приводит к увеличению диаметра пучка на узлах оптической системы, а также к дефокусировке перетяжки на выходе фокусатора на величину, равную конфокальному параметру пучка.

Заключение

В работе получены аналитические выражения, позволяющие провести оценочный анализ лазерной оптической системы и рассчитать пространственные параметры формируемого лазерного пучка с учётом нагрева линз. Полученные результаты согласуются с практическими данными [9], согласно которым для линз оптической системы из кварцевого стекла также имеет место смещение выходной перетяжки ближе к защитному стеклу, причём её размер практически не изменяется.

Для уменьшения влияния нагрева линз на пространственные параметры пучка в зоне обработки материала можно разработать атермализованную формирующую оптическую систему. С другой стороны, отклонение пространственных параметров пучка в зоне обработки материала можно компенсировать за счёт подвижек узлов формирующей оптической системы: $(-s_{p1} + \delta_{\text{кол}})$ – от входной перетяжки до узла коллиматора и $(d_2 - \delta_{\text{кол}} + \delta_{\text{фок}})$ – между узлами оптической системы, где δ – величина продольного смещения соответствующего узла (влево относительно исходного положения – отрицательное, вправо – положительное).

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Mahrle A., Beyer E. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2009. Vol. 42. No. 17. P. 175507.
2. Powell J., Kaplan A. F. H. / 31st International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. 2012. P. 277–281.
3. Вакс Е. Д., Миленский М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. – М.: Техносфера, 2013.
4. Григорьянц А. Г., Васильцов В. В. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/laser/223.html>
5. Blomster O., Pålsson M., Roos S.-O. // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6871. P. 68712B.
6. Scaggs M., Haas G. / 29th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2010 – Congress Proceedings. 2010. Vol. 103. P. 1511–1517.
7. Maerten O., Kramer R., Schwede H., Wolf S., Brandl V. // Laser + Photonics. 2008. No. 2. P. 48.
8. Blomqvist M., Blomster O., Pålsson M., Campbell S., Becker F., Rath W. // Proc. SPIE. 2011. Vol. 7912. P. 791216.
9. Harrop N., Wolf S., Maerten O., Dudek K., Ballach S., Kramer R. // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9741. art.no. 97410P.
10. Ширанков А. Ф., Носов П. А., Григорьянц А. Г., Третьяков Р. С., Самарин П. Е. // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 5. С. 37.
11. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. – М.: Искусство, 1978.
12. Носов П. А., Ширанков А. Ф., Третьяков Р. С., Григорьянц А. Г., Ставертий А. Я. // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 12. С. 1028–1033.
13. Васильцов В. В., Галушкин М. Г., Дубров В. Д., Егоров Э. Н., Низьев В. Г., Панченко В. Я. / Сб. научн. трудов XXII Междунар. научно-техн. конф. «Лазеры в науке, технике, медицине», г. Геленджик, 19–24 сентября 2011. Т. 22. С. 38–43.
14. Пахомов И. И., Цибуля А. Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. – М.: Радио и связь, 1986.
15. Основные характеристики промышленных волоконных лазеров. URL: <http://www.ntoire-polus.ru/HP%20fiber%20laser.pdf>

Thermo-optical analysis of forming systems of high-power fiber lasers

P. A. Nosov

Bauman Moscow State Technical University
5/1 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: pan@bmstu.ru

Received December 1, 2016

The features of the operation of the optical systems, forming the radiation beam of high-power fiber lasers, are discussed. A formula for the calculation of the change in the focal length of the lenses of the forming optical system due to their heating is given. The approximate expressions for the thermo-optical analysis of laser optical systems are obtained. These expressions allow calculating the spatial parameters of the formed laser beam (waist diameter, waist position, confocal parameter, angular divergence) and the focal shift factor (FSF). A method for compensating the deviation of the spatial parameters of the beam in the material processing zone caused by heat of the lenses is proposed. An example of the analysis of a laser optical system is considered.

Keywords: laser optics, laser beam, high-purity silica glass, high-power fiber laser, optical system, thermal-optical aberration, laser technology.

REFERENCES

1. A. Mahrle and E. Beyer, *Journal of Physics D: Applied Physics* **42**, 175507 (2009).
2. J. Powell and A. F. H. Kaplan, in *Proc. ICALEO 2012 - 31st International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*. (2012). P. 277-281.
3. E. D. Vax, M. N. Milenky, and L. G. Saprykin, *Practice of precision laser processing*. (Technosphere, Moscow, 2013) [in Russian].
4. A. G. Grigoryants and V. V. Vasil'tsov, *Inzhenern. Zhurnal: Nauka i Innovatsii*, No 6, (2012) (URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/laser/223.html>).
5. O. Blomster, M. Pålsson, and S.-O. Roos, *Proc. SPIE* **6871**, 68712B (2008).
6. M. Scaggs and G. Haas, in *Proc. 29th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2010 – (Congress Proceedings. 2010.)* V. 103, P. 1511–1517.
7. O. Maerten, R. Kramer, H. Schwede, S. Wolf, and V. Brandl, *Laser + Photonics*. No 2, 48 (2008).
8. M. Blomqvist, O. Blomster, M. Pålsson, S. Campbell, F. Becker, and W. Rath, *Proc. SPIE* **7912**, 791216 (2011).
9. N. Harrop, S. Wolf, O. Maerten, K. Dudek, S. Ballach, and R. Kramer, *Proc. SPIE* **9741**, 97410P (2016).
10. A. F. Shirankov, P. A. Nosov, A. G. Grigoryants, R. S. Tretyakov, and P. E. Samarin, *Naukoemkie Tekhnol. v Mashinostroyenii*, No 5, 37 (2014).
11. D. S. Volosov, *Photographic Optics*. (Iskusstvo, Moscow, 1978) [in Russian].
12. P. A. Nosov, A. F. Shirankov, R. S. Tretyakov, A. G. Grigoryants, and A. Y. Stavertiy, *Izv. Vuzov. Priborostroyeniye* **59** (12), 1028–1033 (2016).
13. V. V. Vasil'tsov, M. G. Galushkin, V. D. Dubrov, E. N. Egorov, V. G. Niziev, and V. Y. Panchenko, in *Proc. XXII International scientific and technical conference «Lasers in science, engineering, medicine»* (Gelendzhik, September 19–24, 2011) Vol. 22, P. 38.
14. I. I. Pakhomov and A. B. Tsiulya, *Calculating the optical systems of laser devices*. (Radio i Svyaz', Moscow, 1986) [in Russian].
15. <http://www.ntoire-polus.ru/HP%20fiber%20laser.pdf>