

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ФОРМИРУЮЩИХ ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Г. Н. Мартынов, П. А. Носов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

1. Введение

Термооптический эффект, заключающийся в изменении оптических характеристик материалов при их нагреве, является распространенной проблемой в оптических системах (ОС) различного назначения. Изменение показателя преломления и деформации оптических элементов приводят к возникновению так называемой тепловой линзы – дополнительной оптической силы. В лазерной технике термооптический эффект возникает вследствие поглощения излучения и требует внимания при разработке лазерных систем. Так, тепловая линза, наведенная излучением накачки в активной среде, ухудшает качество излучения [1] и нарушает режим генерации лазера [2]. Аналогичный эффект имеет место и в лазерных ОС – возникающая тепловая линза приводит к дополнительным искажениям выходного пучка [3].

Одна из областей применения лазерной техники, для которой актуально использование мощных лазеров, – обработка материалов, основанная на тепловом воздействии сфокусированного лазерного пучка на вещество. На сегодняшний день мощность излучения технологических лазерных установок на базе волоконных лазеров достигает единиц, а то и десятков киловатт в непрерывном режиме [4, 5]. Вызванное термооптическими aberrациями снижение качества пучка [6], а именно: явление дефокусировки, увеличение размера рабочего пятна, нарушение пространственного распределения мощности приводят к нарушению заданного режима обработки и ухудшению качества обработки материалов.

Таким образом, стоит задача анализа лазерных оптических систем с учетом их нагрева, а также, как следствие, разработка методики такого анализа.

2. Оптические системы лазерных технологических установок

Широко распространенная базовая компоновка ОС технологических установок на базе волоконных лазеров, рассматриваемых в настоящей работе, включает в себя волоконный коннектор, коллиматор и фокусирующий узел, а также защитное окно для предохранения оптики от загрязнения пылью и продуктами обработки материала [7].

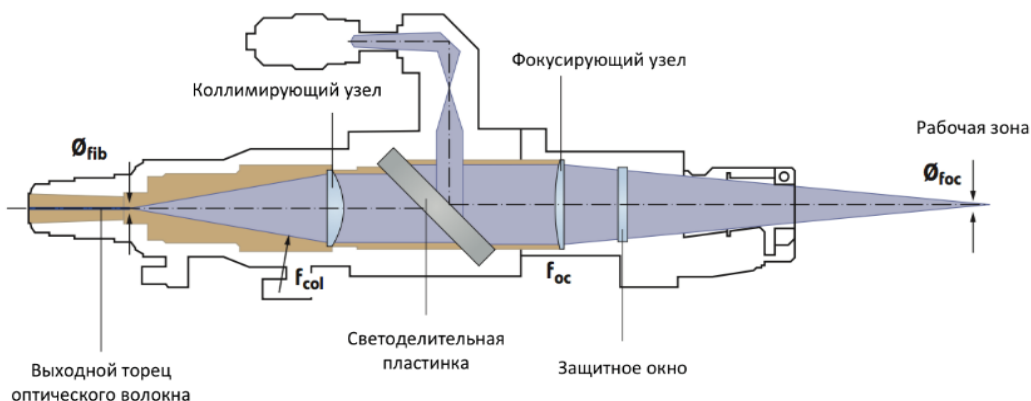


Рис. 1. Оптическая система технологической головки

Простейшие и удобные для рассмотрения коллиматор и фокусирующий узел выполняются однолинзовыми с коррекцией сферической аберрации. Как правило, материалом оптических элементов служат различные марки кварцевого стекла (КУ-1, Suprasil, Infrasil). Также на оптические элементы наносят просветляющее покрытие на рабочей длины волны с целью снижения светознергетических потерь на переотражение.

Для описания преобразования лазерного излучения ОС будем использовать следующие параметры пучка: радиус перетяжки ρ_0 , угловую расходимость 2θ , конфокальный параметр z_k , параметр качества M^2 , а также смещение перетяжки относительно фокуса оптического элемента z_p . При этом параметры пучка взаимосвязаны:

$$\rho_0 \theta = \frac{\rho_0^2}{z_k} = M^2 \frac{\lambda}{\pi}. \quad (1)$$

Преобразование параметров пучка описывается формулами [8] (параметры со штрихом – после преобразования ОС):

$$\frac{z'_k}{z_k} = -\frac{z'_p}{z_p} = \left(\frac{2\theta}{2\theta'}\right)^2 = \left(\frac{\rho'_0}{\rho_0}\right)^2 = \alpha_\Gamma = \frac{f'^2}{z_p^2 + z_k^2}, \quad (2)$$

где α_Γ – коэффициент продольного увеличения оптического элемента, f' – фокусное расстояние преобразующего элемента.

Для двухкомпонентной системы, состоящих из коллимирующего и фокусирующего узлов, удобно применять формулу:

$$\rho'_{обр} = \rho_0 \frac{f_{фок}}{f_{колл}}, \quad (3)$$

где $\rho'_{обр}$ – размер перетяжки пучка после ОС, $f_{фок}$ – фокусное расстояние фокусирующего узла, $f_{колл}$ – фокусное расстояние коллиматора.

3. Физические принципы формирования тепловой линзы

Тепловые эффекты в оптических элементах вызваны поглощением проходящего излучения. Интенсивность проходящего излучения изменяется в среде согласно закону Бугера [9]:

$$I(x, y, z) = I_0(x, y) e^{-\delta z}, \quad (4)$$

где $I_0(x, y)$ – излучение на входе в среду, δ – коэффициент поглощения излучения в среде.

Таким образом, доля поглощенного средой излучения, служащая источником тепла, равна:

$$Q(x, y, z) = \delta I(x, y, z) = \delta I_0(x, y) e^{-\delta z}. \quad (5)$$

Распределение температуры в среде в общем случае описывается уравнением теплопроводности [10]:

$$\rho c_p \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = \nabla [k(T) \nabla T(x, y, z)] + Q(x, y, z), \quad (6)$$

где ρ – плотность среды, c_p – теплоемкость, $k(T)$ – теплопроводность, $Q(x, y, z)$ – функция, описывающая распределение в среде источников тепла.

Примем некоторые допущения. Будем считать теплопроводность стекла независимой от температуры, а также рассмотрим случай работы лазера в непрерывном режиме, что позволяет пренебречь производной по времени. Таким образом, уравнение теплопроводности (7) запишем в виде:

$$-k\nabla^2 T(x, y, z) = Q(x, y, z). \quad (7)$$

Помимо этого, учтем тепловой поток, вызванный конвекционным теплообменом поверхностей линз с воздухом:

$$-k\nabla T(x, y, z) = h(T(x, y, z) - T_0), \quad (8)$$

где h – коэффициент теплообмена, T_0 – температура окружающей среды.

Решая уравнения (7)–(8) с учетом (5), можно получить распределение температуры в среде, наведенной поглощенным излучением.

Основные процессы, изменяющие характеристики оптических элементов при нагреве, – это тепловые деформации и изменение показателя преломления. Термические напряжения, наведенные изменением температуры ΔT , описываются выражением:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T, \quad (9)$$

где α – коэффициент температурного расширения. Термические напряжения приводят к расширению оптических элементов, изменению их толщин и формы поверхностей. Более точное описание деформаций требует учета условий базирования в оправе.

Также изменение температуры приводит к изменению показателя преломления материала:

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T, \quad (10)$$

где $\frac{\partial n}{\partial T}$ – термооптическая постоянная материала.

Процессы деформации и изменения показателя преломления приводят к изменению оптической силы элемента Φ . В простейшем случае оно описывается формулой [14]:

$$\frac{d\Phi}{dT} = \Phi \left[\frac{1}{(n-1)} \frac{\partial n}{\partial T} - \alpha \right]. \quad (11)$$

4. Методика моделирования

4.1. Актуальность метода конечных элементов, итерационное моделирование. Анализировать ОС, с учетом большого количества физических процессов, а также их взаимосвязь, не прибегая к аналитическому решению уравнений, что допустимо и полезно в инженерной практике, позволяет численное моделирование [11, 12]. В частности, поставленную задачу выгодно решать методом конечных элементов, основанном на разбиении области анализа на малые элементы конечного размера и последующем решении требуемых дифференциальных уравнений в дискретном пространстве. При этом, проводя моделирование итерационно, несколько раз, можно получить решение, описывающее стационарный режим работы ОС.

4.2. Моделирование распространения лазерного излучения. Лучевой пакет. Отдельного упоминания стоит способ моделирования прохождения излучения через оптическую систему. В настоящее время наиболее широко распространено два метода расчета распространения света в пространстве, применяемых при численном моделировании: метод трассировки лучей и метод численного решения уравнений Максвелла.

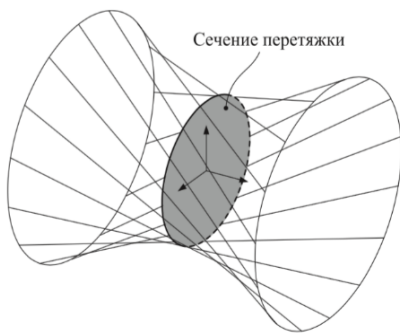


Рис. 2. Пространственный лучевой пакет

При всей строгости и предпочтительности волновых методов, они вычислительно затратны для анализа ОС, что делает геометрооптический анализ выгодной альтернативой. При этом адекватный результат позволяет получать метод лучевых пакетов [8], основанный на геометрическом анализе формы каустики лазерного пучка, являющейся однополостным гиперboloидом вращения.

Лучи в лучевом пакете соответствуют образующим прямым гиперболической каустики, то есть представляют собой множество лучей с направляющими векторами \vec{v}_1 или \vec{v}_2 , координаты которых в декартовой системе описываются выражением [13]:

$$\vec{v}_{1,2} = \left\{ \frac{\rho_0^2}{x^2 + y^2} \begin{pmatrix} xz \\ z_k \pm y \end{pmatrix}; \frac{\rho_0^2}{x^2 + y^2} \begin{pmatrix} yz \\ z_k \mp x \end{pmatrix}; z_k \right\}, \quad (12)$$

где x, y, z – координаты точки на поверхности равной интенсивности, ρ_0 – радиус поверхности равной интенсивности.

Так как представляется удобным задавать лучи в плоскости перетяжки, преобразуем выражение (12) для этого случая ($z = 0, \sqrt{x^2 + y^2} = \rho_0$):

$$\vec{v}_{1,2} = \{\pm y; \mp x; z_k\}, \quad (13)$$

Распространение лучевого пакета в пространстве может проводиться известными методами геометрической оптики. Таким образом, метод лучевых пакетов позволяет оценить размер перетяжки, расходимость и конфокальный параметр лазерного пучка на выходе реальной оптической системы.

Применение метода лучевых пакетов для термооптического анализа требует уточнения, так как необходимо определять распределение мощности в пространстве. Поскольку лазерный пучок можно рассматривать как совокупность вложенных гиперboloидов, определенных по разному уровню интенсивности, становится возможным задавать профиль распределения мощности в пучке, предписывая каждому лучевому пакету требуемую интенсивность по известному распределению мощности в перетяжке.

Рассмотрим методику, которая позволяет задать пучок с радиальной зависимостью плотности интенсивности в перетяжке $I_0(r)$ в виде M лучевых пакетов, определенных N лучами.

1. Исходное распределение плотности мощности в перетяжке $I_0(r)$ преобразуется в M кольцевых зон с границами $[r_i; r_i + \Delta r]$, $\Delta r = \frac{\rho_c}{M}$;

2. Кольцевые зоны разбиваются на N ячеек каждая с границами в угловых координатах $[\varphi_i; \varphi_i + \Delta\varphi]$, $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{N}$.

3. Каждой ячейке предписывается луч, обладающий мощностью:

$$P_{ri} = \int_{\varphi_i}^{\varphi_i + \Delta\varphi} d\varphi \int_{r_i}^{r_i + \Delta r} I_0(r) r dr. \quad (14)$$

Преобразуя (14) и для простоты упрощая интегрирование по радиальной координате аналогично методу левых прямоугольников, можем получить формулу, позволяющую приближенно определить мощности лучей лучевых пакетов:

$$P_{ri} = \frac{\pi}{N} I_0(r_i) \left[\left(r_i + \frac{\rho_0}{M} \right)^2 - (r_i)^2 \right]. \quad (15)$$

5. Моделирование работы ОС

5.1. Условия анализа. Для анализа была выбрана двухкомпонентная ОС, состоящая из плосковыпуклых линз, обладающая следующими характеристиками:

- фокусное расстояние коллимирующего узла 100 мм;
- фокусное расстояние фокусирующего узла 150 мм;
- диаметр оптических элементов 25,4 мм;
- коэффициент линейного увеличения ОС 1,5.

Работа ОС была промоделирована методом конечных элементов. При создании модели были учтены физические процессы, описанные в п. 3 и п. 4. Рассматривалось прохождение пучка с параметром $M^2 = 1$ и диаметром перетяжки $2\rho_0 = 50$ мкм при различных мощностях излучения $P = 1; 100; 1000; 4000$ Вт; лучевые пакеты задавались с гауссовым распределением интенсивности по вышеописанной методике.

Целью моделирования являлось получение следующих результатов:

- каустика пучка, проходящего через ОС без учета тепловых aberrаций (эталонные данные);
- каустика высокомощного пучка, проходящего через ОС;
- оценка величины нагрева и сравнение с экспериментальными результатами.

5.2. Результаты моделирования. Траектории лучей в пространстве показаны на рис. 3. Цвет лучей соответствует их расстоянию от оси.

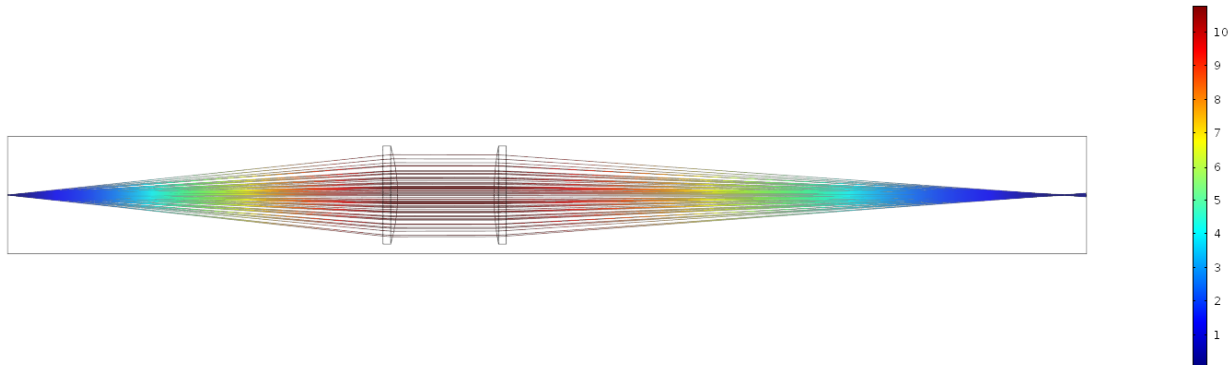


Рис. 3. Трассировка лучей через оптическую систему

Трассировка лучей через ОС без учета тепловой линзы (при малой мощности излучения) показала следующие результаты: ОС формирует перетяжку на расстоянии 150 мм от фокусирующего узла, радиус перетяжки равен 39 мкм (рис. 4). Эти данные считаются эталонными.

Трассировка пучка с учетом нагрева (рис. 5) показывает следующие эффекты:

- смещение перетяжки на 1,5 мм, что объясняется изменением оптической силы линз ОС;
- увеличение расходимости излучения до 10 мрад (без тепловой линзы 9 мрад);
- незначительное изменение пространственных параметров пучка при мощности излучения менее 1 кВт.



Рис. 4. Каустика пучка при моделировании без учета тепловой линзы

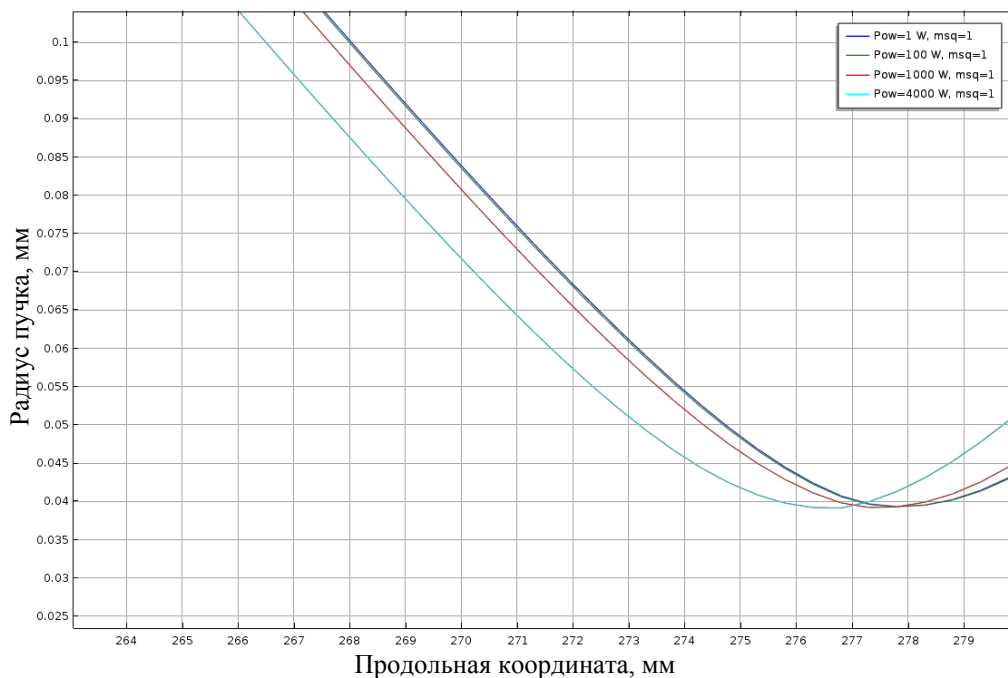


Рис. 5. Каустика пучка в рабочей зоне с учетом тепловой линзы (цвет линии соответствует мощности: синий – 1 Вт; зеленый – 100 Вт; красный – 1000 Вт, бирюзовый – 4000 Вт)

Данные о нагреве оптических элементов (разница температуры на оси линзы и температуры окружающей среды) в зависимости от мощности приведены в таблице. Для сравнения в этой же таблице приведены экспериментальные результаты.

Нагрев оптических элементов в зависимости от мощности излучения

Мощность излучения, Вт	Нагрев оптического элемента, К	
	моделирование	эксперимент
1	0,005	–
100	0,52	–
150	–	1,2
1000	5,28	5,2
3000	–	15,3
4000	21,5	–

Полученное в ходе моделирования распределение на поверхности линзы показано на рис. 6. На рис. 7 представлено распределение нагрева линзы в зависимости от радиальной координаты.

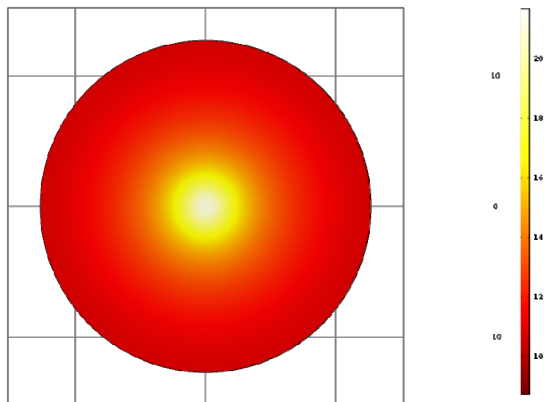


Рис. 6. Распределение температуры на линзе

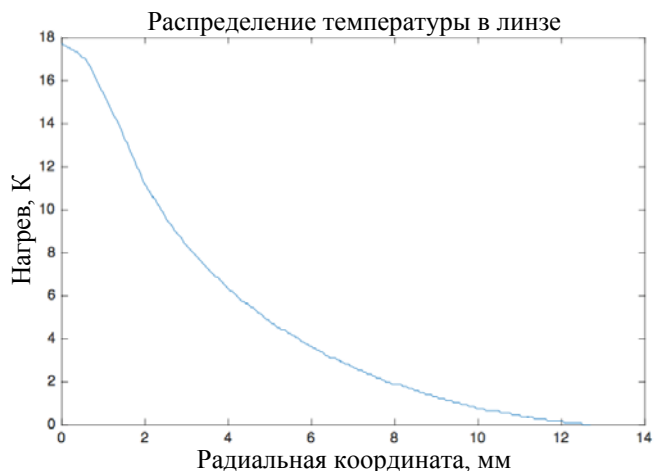


Рис. 7. Вид распределения температуры

6. Выводы

Предложенный модифицированный метод лучевых пакетов, будучи менее вычислительно затратным, чем методы численного решения волновых уравнений, позволяет проводить анализ ОС, формирующих высокоомощное лазерное излучение, оценивать величину нагрева оптических элементов, а также пространственные параметры пучка на выходе ОС. Метод показывает результаты, сходные с экспериментальными данными [15, 16] и может применяться не только для анализа, но и при синтезе ОС, в том числе атермализованных [14], то есть спроектированных с компенсацией термоаббераций.

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

Список литературы

1. Graupeter T., Pflaum C. Stability analysis of solid-state lasers regarding thermal lens effect; Proc. SPIE, 8433 (June 1, 2012).
2. Ashoori et al. Heat generation and removal in solid state lasers; licensee InTech, DOI 10.5772/2623.
3. Penano et al. Optical quality of high-power laser beams in lenses; Vol. 26 No. 3/March 2009/J. Opt. Soc. Am. B.
4. Дианов Е. М. Волоконная оптика: сорок лет спустя. Квантовая электроника. 40, No 1 (2010).
5. Промышленные волоконные лазеры, НТО ИРЭ-Полюс http://www.ntoire-polus.ru/products_powerful.html.
6. Blomster et al. SPIE Photonics West conf. January 2008.
7. Ширанков А. Ф., Носов П. А., Григорьянц А. Г., Третьяков Р. С. Разработка оптических головок технологических установок с мощными волоконными лазерами; Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012.
8. Пахомов И. И., Цибуля А. Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. – М.: Радио и связь, 1986.
9. Физическая оптика: Учебник. 2-е изд. / С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин. – М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004. 656 с.

10. Уравнение математической физики: Учебник. – 7-е изд. / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Изд-во МГУ; Изд-во «Наука», 2004. 798 с.
11. Bonhoff et al. Modeling of optical aberrations due to thermal deformation using finite element analysis and ray tracing; DOI: 10.1117/12.2190879.
12. Genberg V. Thermal and thermoelastic analysis of optics, Optomechanical Engineering Handbook, CRC Press, 1999.
13. Носов П. А. и др. Абберационный синтез лазерных оптических систем, предназначенных для преобразования многомодовых пучков. Оптический журнал, 78, 9, 2011.
14. Smith W. J. Modern Optical Engineering. 3rd edition, McGraw Hill, 2000.
15. Maerten O. et al. The characterization of focusing systems for high-power lasers with high beam quality Laser+Photonics #2, 2008.
16. Michael Scaggs, Gil Haas, Thermal lensing compensation optic for high power lasers, DOI: 10.1117/12.871370.