

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ТЕПЛОВОЙ ЛИНЗЫ
В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ,
ФОРМИРУЮЩЕЙ МОЩНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА**

А. В. Добиков¹, Г. П. Санников¹, М. В. Скоблова^{1,2*}

¹ *Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия*

² *Филиал Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Саров, Россия*

* *MVSkoblova@vniief.ru*

Аннотация. Исследуется тепловая линза в оптической системе, формирующей мощное непрерывное излучение ближнего ИК-диапазона ($\lambda = 1,07 \text{ мкм}$). Цель работы — выбор материала для изготовления элементов оптической системы стенда, разрабатываемого для исследований порогов разрушения оптических материалов непрерывным лазерным излучением, на основе результатов численного моделирования эффекта тепловой линзы. В качестве материала оптических элементов рассмотрены оптическое бесцветное стекло марки N-BK7, синтетический плавленый кварц Suprasil, фторид кальция (CaF_2). Моделирование процессов нагрева и деформаций оптических элементов проведено методом конечных элементов. С использованием метода трассировки лучей проведен анализ искажений волнового фронта пучка и рассчитана дефокусировка. Проанализирован вклад термодеформаций рабочих поверхностей элементов и температурного изменения показателя преломления материала в искажение волнового фронта проходящего излучения. Проведен анализ влияния термоабберраций на размер рабочего пучка. Полученные результаты могут быть полезны при подборе оптических материалов для элементов оптических систем мощных лазеров.

Ключевые слова: лазерная оптика, оптические материалы, термооптический эффект, метод конечных элементов, термоабберрации оптической системы

Ссылка для цитирования: Добиков А. В., Санников Г. П., Скоблова М. В. Численное моделирование эффекта тепловой линзы в оптической системе, формирующей мощное излучение ближнего ИК-диапазона // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 3. С. 249–254. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-3-249-254.

**NUMERICAL SIMULATION OF THE THERMAL LENS EFFECT IN AN OPTICAL SYSTEM
GENERATING POWERFUL NEAR-IR RADIATION**

A. V. Dobikov¹, G. P. Sannikov¹, M. V. Skoblova^{1,2}

¹ *Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia*

² *M. V. Lomonosov Moscow State University, Sarov Branch, Sarov, Russia*

* *MVSkoblova@vniief.ru*

Abstract. A thermal lens in an optical system generating powerful continuous radiation in the near-IR range ($\lambda = 1.07 \mu\text{m}$) is investigated. The objective of the work is to select a material for manufacturing elements of a bench optical system being developed for investigations of the destruction threshold of optical materials by continuous laser radiation, based on results of numerical modeling of the thermal lens effect. N-BK7 optical colorless glass, Suprasil synthetic fused quartz, and calcium fluoride (CaF_2) are considered as the material of the optical elements. The processes of heating and deformation of the optical elements are modeled using the finite element method. Using the ray tracing method, the analysis of beam wavefront distortions is performed and defocusing is calculated. The contribution of thermal deformations of the working surfaces of the elements and the temperature change in the refractive index of the material to the distortion of the wave front of transmitted radiation is analyzed. The effect of thermal aberrations on the size of the working beam is analyzed. The obtained results can be useful in selecting optical materials for elements of optical systems of high-power lasers.

Keywords: laser optics, optical materials, thermo-optic effect, finite-element method, thermal aberrations of optical system

For citation: Dobikov A. V., Sannikov G. P., Skoblova M. V. Numerical simulation of the thermal lens effect in an optical system generating powerful near-IR radiation. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 3. P. 249–254 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-3-249-254.

Введение. Лазеры ближнего ИК-диапазона (1,06–1,08 мкм) киловаттного уровня мощности находят широкое применение в промышленной обработке и научных исследованиях. Функцию обеспечения требуемой плотности мощности излучения в месте воздействия для технологического процесса или экспериментального исследования выполняет оптическая система. Элементы оптической системы вследствие поглощения проходящего излучения нагреваются. Процессы, следующие за нагревом, такие как деформация и изменение показателя преломления материала оптических элементов, приводят к возникновению так называемой тепловой линзы — дополнительной оптической силы. Тепловая линза вызывает изменение оптических характеристик системы: появляется дефокусировка, увеличивается размер рабочего пучка, нарушается пространственное распределение мощности [1–3]. Таким образом, при разработке оптической системы, пред назначенной для формирования мощного лазерного излучения, важно проводить термооптический расчет. Результаты такого расчета имеют весомое значение при обосновании выбора материала силовой оптики.

В настоящей статье в целях выбора наиболее подходящего материала для элементов оптической системы стенда, предназначенного для исследований порогов разрушения оптических материалов непрерывным лазерным излучением [4, 5], проводится численный расчет термооптических эффектов. С помощью метода конечных элементов рассчитываются температура и деформация оптических элементов при их непрерывном облучении. Методом трассировки лучей проводится анализ искажений волнового фронта проходящего лазерного излучения и изменения размера пятна в зоне расположения исследуемого образца.

Расчетные исследования и результаты. Схема оптической системы, формирующей излучение лазера, представлена на рис. 1. Оптическая система содержит лазерный источник, диафрагму, линзу коллиматора и фокусирующий объектив с фокусными расстояниями соответственно 450 и 4100 мм. Диаметр оптических элементов 50,8 мм, толщина по центру 8 мм. Параметры лазерного источника: режим работы — непрерывный; длина волны $\lambda = 1,07$ мкм; расходимость (половинный угол) 0,045 рад; мощность излучения 3 кВт. Для защиты оправ оптических элементов от прямого попадания лучей перед объективом установлена диафрагма, на которой осаждается 6,5 % лазерной мощности.

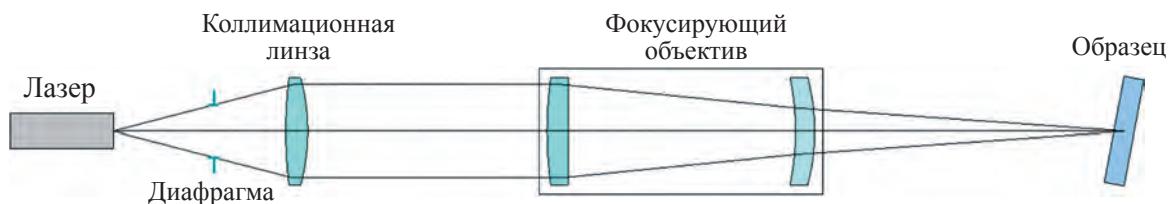


Рис. 1

Проведем численный расчет тепловой линзы, образующейся в оптической системе в результате поглощения проходящего излучения, в целях выбора наиболее подходящего материала для изготовления оптических элементов. Критерием применимости материала для изготовления элементов примем следующее условие: размер пучка в плоскости размещения образца не должен увеличиться более чем на 10 % от номинального значения. При расчете термолинзы будем рассматривать влияние двух эффектов: теплового расширения и зависимости показателя преломления материала от температуры нагрева (dn/dT). В качестве материала оптических элементов формирующей системы будем рассматривать плавленый кварц Suprasil [6], фторид кальция (CaF_2) [7] и оптическое стекло N-BK7 [8]. Термофизические параметры материалов приведены в табл. 1. Коэффициент поглощения кварцевого стекла и фторида кальция на рабочей длине волны примем равным $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ [9, 10], стекла N-BK7 — $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ [11]. Коэффициент конвективного теплообмена рабочих поверхностей линз с воздухом зададим равным 10 Вт/($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). Начальная температура линз 22°C . Крепление линз — жесткое, за торцевые грани. Время воздействия лазерного излучения — 2 мин.

Таблица 1

Параметр	Плавленый кварц	Фторид кальция	Стекло N-BK7
Модуль Юнга, МПа	$72 \cdot 10^3$	$75,8 \cdot 10^3$	$82,0 \cdot 10^3$
Коэффициент Пуассона	0,16	0,26	0,206
Плотность, кг/м ³	2200	3180	2510
Коэффициент теплового расширения, 1/К	$0,51 \cdot 10^{-6}$	$18,5 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	1,38	9,71	1,114
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	770	854	858
Термооптический коэффициент, 1/К	$9,8 \cdot 10^{-6}$	$-10,6 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$

Следует отметить, что варианты оптических схем, использующих разные материалы, отличаются радиусами кривизны рабочих поверхностей линз, это связано с проведенной оптимизацией схем. Критерием оптимизации было условие получения минимального размера пятна рассеяния в месте расположения образца.

Моделирование процессов нагрева и деформаций оптических элементов проведено методом конечных элементов. Полученные в ходе моделирования распределение температуры (а) и эпюра деформаций (б) в компонентах оптической системы из кварцевого стекла после двухминутного нагрева представлены на рис. 2. Максимальный нагрев (конечная температура минус начальная) испытывает последняя по ходу излучения линза в своем центре, температура повышается на 0,68 °C. Край этой линзы нагревается меньше всего в системе, минимальный нагрев составляет 0,05 °C. Перепад температуры между центром и краем первой линзы равен 0,23 °C, второй линзы — 0,22 °C, третьей линзы — 0,63 °C. Максимальная деформация в системе — 4,9 нм. Под максимальной деформацией здесь и далее понимается наибольшее продольное (по толщине) смещение точек поверхности самого элемента.

а)



б)



Рис. 2

Результаты расчета температуры и деформаций поверхностей оптических элементов из разных материалов приведены в табл. 2. Максимальный нагрев 47,84 °C получен в линзовой системе из стекла N-BK7. В линзах из фторида кальция градиент температуры в радиальном направлении имеет самое низкое значение, что связано с большой теплопроводностью материала. В линзах из кварцевого стекла наблюдается самая малая деформация поверхностей, что обусловлено наименьшим значением коэффициента теплового расширения.

Таблица 2

Параметр	Плавленый кварц	Фторид кальция	Стекло N-BK7
Максимальный нагрев в системе, ... °C	0,68	0,185	47,84
Минимальный нагрев в системе, ... °C	0,05	0,082	1,58
Перепад температуры между центром и краем, ... °C:			
— на первой линзе	0,23	0,04	16,46
— на второй линзе	0,22	0,04	16,46
— на третьей линзе	0,63	0,10	47,68
Максимальная деформация поверхностей, нм	4,92	83,79	4187,1

С использованием метода трассировки лучей проведен анализ искажений волнового фронта пучка и рассчитана дефокусировка. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	Плавленый кварц	Фторид кальция	Стекло N-BK7
PV волнового фронта при учете, нм:			
— только деформаций поверхностей	1,5	10,6	1897,7
— только отношения dn/dT	60,6	-12,6*	1065,2
Итоговое PV волнового фронта, нм	62,0	-4,4	2948,7
Дефокусировка, мм	-0,68	0,05	-126,4

П р и м е ч а н и я. PV — peak-to-valley — размах отклонений волнового фронта от начального состояния; знак „+“ при PV относится к типу дефокусировки, знак „—“ при PV в данном случае означает увеличение фокусного расстояния.

Наименьшее искажение волнового фронта пучка при прохождении элементов из фторида кальция связано с двумя факторами: 1) малые градиенты температур в поперечном направлении линз; 2) отрицательное значение термооптического коэффициента фторида кальция (из-за этого механизмы возникновения тепловой линзы частично компенсируют друг друга). В линзовой системе из кварцевого стекла искажение волнового фронта незначительное. Но можно заметить, что основной вклад в тепловую линзу системы вносит температурное изменение показателя преломления. В оптической системе, где в качестве материала элементов рассматривалось стекло N-BK7, получены наибольшие искажение волнового фронта и дефокусировка перетяжки.

Проведен анализ изменения размера пятна по уровню концентрации энергии 80 % в зоне расположения исследуемого образца для разных вариантов схем. При анализе моделировалось прохождение пучка с параметрами: $2\omega_0 = 20$ мкм, $M^2 = 1$, где ω_0 — радиус перетяжки, M^2 — параметр качества пучка. В схемах из кварцевого стекла и фторида кальция изменений в размерах пятен на образце не зарегистрировано. В схеме из стекла N-BK7 диаметр пятна увеличился с 174 (номинальная схема) до 1060 мкм.

Таким образом, для изготовления оптических элементов рассмотренной оптической системы можно успешно использовать как кварцевое стекло, так и фторид кальция.

Заключение. В целях выбора материала изготовления элементов оптической системы стенда проведен численный расчет тепловой линзы. В качестве материала оптических элементов рассмотрены стекло N-BK7, синтетический плавленый кварц Suprasil, фторид кальция (CaF_2). Результаты проведенного расчета методом конечных элементов показывают, что нагрев проходящим лазерным излучением в линзах из фторида кальция и плавленого кварца составляет меньше 1 °C. Нагрев в линзовой системе из стекла N-BK7 составляет 47,84 °C. В схемах из фторида кальция и плавленого кварца искажения волнового фронта пучка незначительные, изменений в размерах пятен в плоскости фокусировки не зарегистрировано, поэтому эти материалы могут быть успешно использованы для изготовления элементов, в отличие от стекла N-BK7. В линзовой системе из стекла N-BK7 максимальный размах волнового фронта составил 2948,7 нм и возникла дефокусировка перетяжки, равная 126,4 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Laskin A., Volpp J. On the selection of materials for high-power laser optics with reduced thermal lensing // High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems XI. SPIE, 2022. Vol. 11994. P. 47–58.
2. Носов П. А., Ширяков А. Ф., Третьяков Р. С. и др. Нагрев оптических элементов из высокочистых кварцевых стекол излучением мощных волоконных лазеров // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 12. С. 1028–1033.
3. Носов П. А. Термооптический анализ формирующих систем мощных волоконных лазеров // Прикладная физика. 2017. № 2. С. 87–91.
4. McElhenny J. E. Continuous Wave Laser Induced Damage Threshold of Ge28Sb12Se60 at 1.07 microns // Frontiers in Optics / Laser Science. 2018. Paper JW4A.5.
5. High Power Pulsed and CW Laser Damage [Электронный ресурс]: www.laserdamage.co.uk/includes/downloads/BRL_CW_white_paper.pdf.
6. Heraeus: кварцевые стекла Suprasil, Infrasil [Электронный ресурс]: www.heraeus-conamic.com/media/Media/Documents/Products_and_Solutions/OPT/EN/Data_and_Properties_Optics_fused_silica_EN.pdf.
7. Материал — кристаллический CaF₂ (кальций фтористый, фторид кальция, Calcium Fluoride) [Электронный ресурс]: www.elektrosteklo.ru/CaF2_rus.htm.
8. SCHOTT: стекло N-BK7 [Электронный ресурс]: www.schott.com/shop/advanced-optics/en/Optical-Glass/SCHOTT-N-BK7/c/glass-SCHOTT N-BK7®.
9. Yoshida S., Reitze D. H., Tanner D. B., Mansell J. D. Method for measuring small optical absorption coefficients with use of a Shack-Hartmann wave-front detector // Appl. Opt. 2003. N 42. P. 4835–4840.
10. Фторид кальция CaF₂ [Электронный ресурс]: www.lightmachinery.com/media/1542/h0607_caf2_product_sheet.pdf.
11. Оптические параметры N-BK7 [Электронный ресурс]: <<https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT>>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Васильевич Добиков

— Российский федеральный ядерный центр — ВНИИ экспериментальной физики, Институт лазерно-физических исследований; начальник научно-исследовательской группы

Григорий Петрович Санников

— Российский федеральный ядерный центр — ВНИИ экспериментальной физики, Институт лазерно-физических исследований; инженер-исследователь

Мария Владиславна Скоблова

— Российский федеральный ядерный центр — ВНИИ экспериментальной физики, Институт лазерно-физических исследований; инженер-исследователь; Филиал в г. Саров МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет; аспирант; E-mail: sckoblowa.m@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.07.21; одобрена после рецензирования 12.09.24; принята к публикации 28.01.25.

REFERENCES

1. Laskin A., Volpp J. *High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems XI*, SPIE, 2022, vol. 11994, pp. 47–58.
2. Nosov P. A., Shirankov A.F., Tret'yakov R.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 12(59), pp. 1028–1033. (in Russ.)
3. Nosov P.A. *Prikladnaya Fizika*, 2017, no. 2, pp. 87–91. (in Russ.)
4. McElhenny J.E. *Continuous Wave Laser Induced Damage Threshold of Ge28Sb12Se60 at 1.07 microns*, in *Frontiers in Optics, Laser Science*, OSA Technical Digest, Optica Publishing Group, 2018, paper JW4A.5.
5. High Power Pulsed and CW Laser Damage, [https://www.laserdamage.co.uk/includes/downloads/BRL_CW_white_paper.pdf](http://www.laserdamage.co.uk/includes/downloads/BRL_CW_white_paper.pdf).
6. [https://www.heraeus-conamic.com/media/Media/Documents/Products_and_Solutions/OPT/EN/Data_and_Properties_Optics_fused_silica_EN.pdf](http://www.heraeus-conamic.com/media/Media/Documents/Products_and_Solutions/OPT/EN/Data_and_Properties_Optics_fused_silica_EN.pdf).
7. [https://www.elektrosteklo.ru/CaF2_rus.htm](http://www.elektrosteklo.ru/CaF2_rus.htm). (in Russ.)
8. [https://www.schott.com/shop/advanced-optics/en/Optical-Glass/SCHOTT-N-BK7/c/glass-SCHOTT N-BK7®](http://www.schott.com/shop/advanced-optics/en/Optical-Glass/SCHOTT-N-BK7/c/glass-SCHOTT N-BK7®).
9. Yoshida S., Reitze D.H., Tanner D.B., Mansell J.D. *Appl. Opt.*, 2003, vol. 42, pp. 4835–4840.
10. [https://www.lightmachinery.com/media/1542/h0607_caf2_product_sheet.pdf](http://www.lightmachinery.com/media/1542/h0607_caf2_product_sheet.pdf). (in Russ.)
11. <https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT>. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS***Alexey V. Dobikov***

- Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Institute of Laser Physical Studies; Head of Research Group

Grigory P. Sannikov

- Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Institute of Laser Physical Studies; Engineer-Researcher

Maria V. Skoblova

- Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Institute of Laser Physical Studies; Engineer-Researcher; M. V. Lomonosov Moscow State University, Sarov branch, Physical Faculty; Post-Graduate Student; E-mail: sckoblawa.m@vniief.ru

Received 09.07.21; approved after reviewing 12.09.24; accepted for publication 28.01.25.