

РАСЧЁТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ ТЕРМОДЕФОРМИРОВАННУЮ ЛИНЗУ

NUMERICAL SIMULATION OF LASER BEAM PROPAGATION THROUGH THE THERMO-DEFORMED LENS

*В. А. Глазунов, Е. А. Кудряшов, А. М. Радайкин, Ф. А. Стариков, Р. А. Шнягин.
V. A. Glazunov, E. A. Kudryashov, A. M. Radaykin, F. A. Starikov, R. A. Shnyagin.*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия,
Институт лазерно-физических исследований,

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

При прохождении мощного лазерного излучения через оптическую систему существует зависимость расходимости излучения от мощности. Деформация линзы и изменение её коэффициента преломления вследствие нагрева могут быть причинами этого эффекта. В данной работе было проведено моделирование нагрева линзы и её деформации при прохождении лазерного излучения. На основании полученных результатов были проведены расчеты искажения волнового фронта пучка. Как показали расчеты, на интервале мощностей от 5 кВт до 25 кВт расходимость линейно возрастает с увеличением мощности. Установлено, что основным фактором, влияющим на качество оптического пучка, для линз, выполненных из плавленного кварца, является изменение показателя преломления вследствие нагрева линзы.

Calculations show the dependence of laser beam divergence on laser power when powerful laser beam passes through optical system. Deformation of lens and its refractive index dependence on temperature may be the main reasons of this effect. Lens heating and its deformation were modeled in this work. Pulse duration was 5 minutes. Wave front distortion was calculated on the base of the results of the lens heating. According to the calculations, divergence linearly depends on power in the range from 5 kW to 25 kW. It was found that the main reason of the divergence increase is refractive index variation.

Будем решать задачу термоупругого деформирования линзы, выполненной из кварца КУ-1, под действием потока лазерного излучения. Линза схематично изображена на рисунке 1.

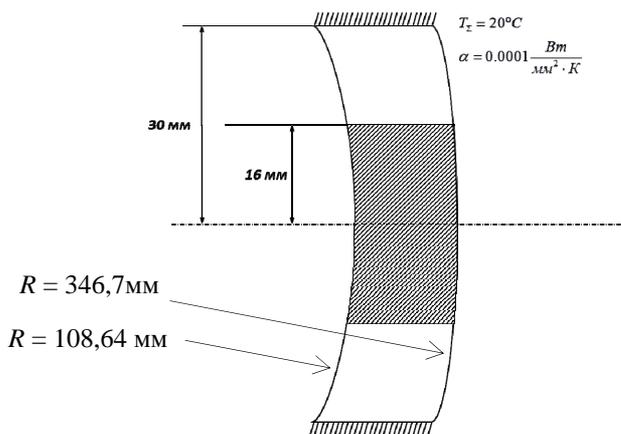


Рис. 1. Постановка задачи

По внешнему радиусу линза жёстко закреплена. На всех внешних поверхностях задаётся граничное условие конвективного теплообмена с окружающей средой, имеющей температуру $T_z = 20^\circ\text{C}$ и коэффициентом конвективной теплоотдачи $\alpha = 0,0001 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot \text{К}}$.

Воздействие потока лазерного излучения равномерной мощности моделируется заданием источника объёмного энерговыделения в центральной области линзы радиусом $r = 32 \text{ мм}$. Принимается, что поглощение излучения по толщине линзы равномерное с заданным коэффициентом $\alpha = 0,0001 \frac{1}{\text{мм}}$. Мощность потока излучения варьируется и принимает значения: $W = 5; 10; 15; 20; 25 \text{ кВт}$.

Деформация и нагрев линзы были рассчитаны для мощностей 5–25 кВт, но из-за ограниченности

объема в данной главе приводятся результаты расчетов только для 5кВт.

Мощность $W = 5$ кВт .

На рис. 2 приведены поля температуры на момент времени $t = 3$ мин.

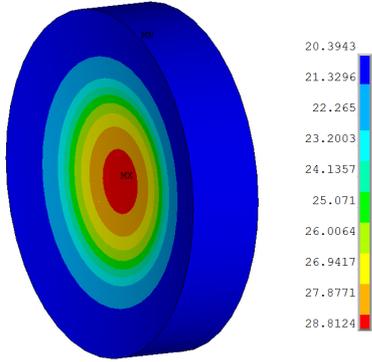


Рис. 2. Поле температуры, $t = 3$ мин

Графики распределения температуры в радиальном направлении на внешней поверхности линзы показаны на рис. 3.

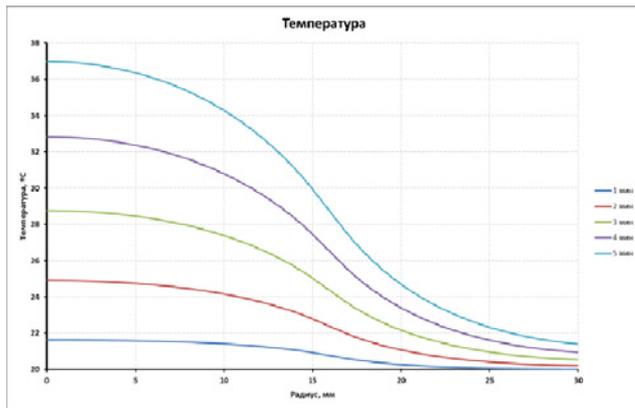


Рис. 3. Распределение температуры

Результаты расчетов термодформации линзы представлены на рис. 4.

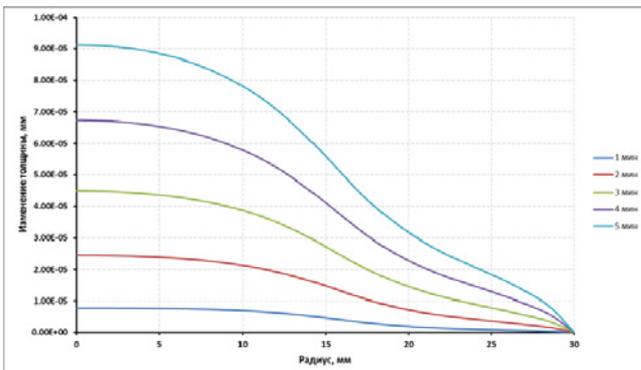


Рис. 4. Графики изменения толщины линзы

Расчет влияния нагрева линзы на качество прошедшего через неё лазерного излучения

На линзу диаметром 60 мм и толщиной 10 мм падает плоский однородный лазерный пучок. Диаметр пучка на линзе составляет 32 мм. В результате воздействия излучения, геометрия линзы меняется из-за термодформаций, вызванных её нагревом. Кроме термодформаций поверхности, приводящих к искажению фронта пучка, на качество пучка влияет также изменение показателя преломления стекла в результате нагрева.

Рассмотрим деформацию фронта волны, нормально падающей на линзу. Изменение длины оптического пути в линзе при нагреве можно представить в следующем виде [1]:

$$W = d \cdot \Delta n + (n - 1) \cdot \Delta d, \quad (1)$$

где d – толщина линзы, n – показатель преломления стекла, Δd – изменение толщины линзы от температуры, Δn – изменение показателя преломления от температуры и напряжений. Распределение функции $\Delta d(r)$ было рассчитано в главе 1 и приведено на рис. 4 для мощности 5 кВт.

В дальнейшем будет использоваться цилиндрическая система координат, ось Z которой совпадает с оптической осью линзы. В силу аксиальной симметрии задачи температурное поле в линзе $T(r, \chi, z)$ не зависит от угла χ . В работе [1] было использовано приближение, в котором пренебрегалось осевым перепадом температуры, т. е. температурное поле не зависит и от координаты z .

Изменение показателя преломления вследствие нагрева имеет вид [1]:

$$\Delta n(r) = \left(\beta - \alpha \cdot E \cdot \frac{C_1 + C_2}{2} \right) \cdot \vartheta(r), \quad (2)$$

где β – абсолютный температурный коэффициент показателя преломления, α – коэффициент температурного расширения, E – модуль Юнга, C_1 и C_2 – фотоупругие постоянные, $\vartheta(r)$ – радиальный перепад температуры: $\vartheta(r) = T(r) - T(R)$, где R – внешний радиус линзы.

Таблица 1
Теплофизические и механические характеристики материала [1]

$\beta \cdot 10^6 = 8,74 \text{ град}^{-1}$
$- C_1 \cdot 10^6 = 0,05 \text{ см}^2/\text{кг}$
$- C_2 \cdot 10^6 = 0,4 \text{ см}^2/\text{кг}$
$\alpha \cdot 10^6 = 0,4 \text{ град}^{-1}$
$n = 1,4565$

Получая из расчетных распределений температуры зависимость радиального перепада $\vartheta(r)$ и используя значения β , α , E , C_1 и C_2 из [1], находим радиальное распределение изменения показателя преломления $\Delta n(r)$ в линзе из КУ-1. Тогда поле в фокальной плоскости линзы можно найти с помощью интеграла Фурье:

$$E(u, v) = \frac{\exp\left[ik(u^2 + v^2)/(2F)\right]}{i\lambda F} \iint E_0(x, y) \times \exp\left[-i\frac{k}{F}(xu + yv)\right] dx dy, \quad (3)$$

где u, v – декартовы координаты в фокальной плоскости линзы, F – фокусное расстояние линзы, $E_0(x, y)$ – поле излучения, прошедшего через линзу, с учетом термдеформаций поверхности и изменения показателя преломления в результате нагрева, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число. Интенсивность в фокальной плоскости равна

$$I(u, v) = |E(u, v)|^2, \quad (4)$$

За исходный пучок принимается распределение интенсивности, изображённое на рис. 5 и моделирующее плоский пучок диаметром 32 мм.

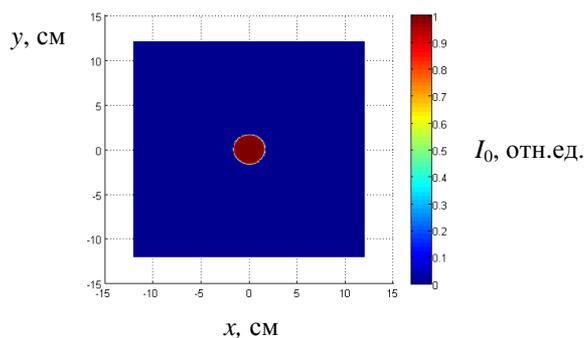


Рис. 5. Распределение интенсивности в дальней зоне линзы

Проводим расчеты влияния тепловых aberrаций линзы на качество лазерного пучка в её фокальной плоскости.

Мощность $W = 25$ кВт.

Доля мощности в зависимости от угла φ и распределение излучения в дальней зоне приведены на рис. 6, 7. Расчеты включали термдеформацию формы поверхностей линзы и изменение

показателя преломления в результате нагрева пучком мощностью 25 кВт.

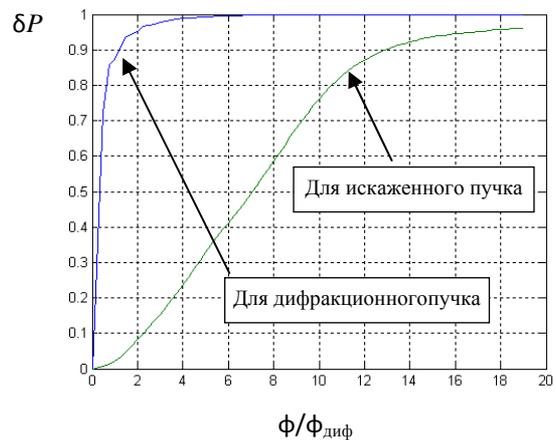


Рис. 6. Доля мощности в зависимости от угла

Из результатов расчетов, представленных на рис. 6, следует, что вследствие нагрева расходимость пучка, прошедшего через термдеформированную линзу, ухудшается до 12 дифракционных углов. За единичный дифракционный угол принимается $\varphi_{\text{диф}} = 2,44 \cdot \frac{\lambda}{S}$, где S – диаметр пучка. Уровень энергии, содержащейся в дифракционном угле, составляет 87,3 % энергии.

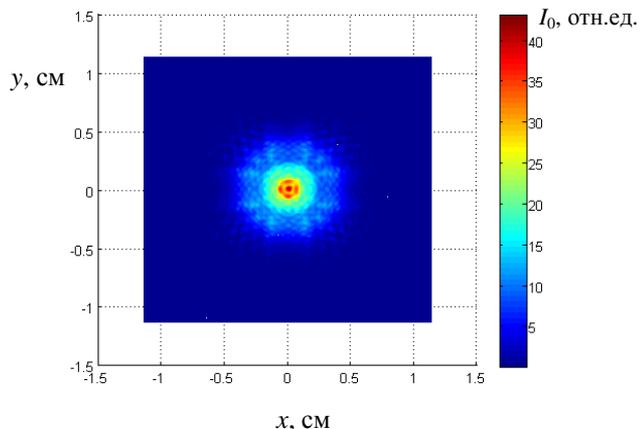


Рис. 7. Распределение интенсивности в дальней зоне линзы

Также были проведены расчеты с учетом только изменения формы поверхностей линзы и без учета изменения показателя преломления от температуры. Результаты расчетов приведены на рис. 8, 9.

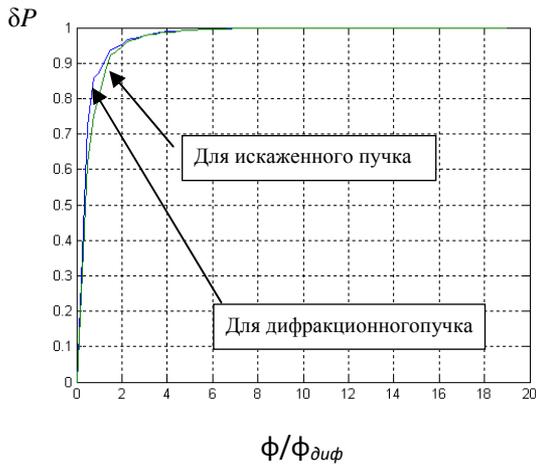


Рис. 8. Доля мощности в зависимости от угла

Из результатов расчетов, представленных на рис. 8, следует, что учет одной лишь деформации поверхностей линзы дает расходимость пучка, равную 1,5 дифракционным углам.

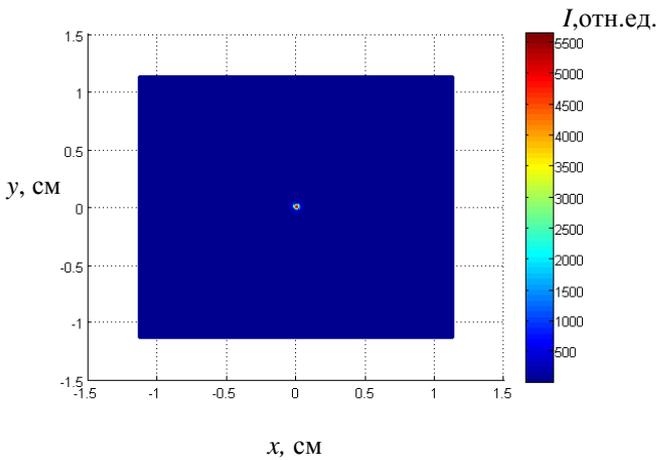


Рис. 9. Распределение интенсивности в дальней зоне линзы

Таким образом, на качество лазерного пучка, прошедшего через термдеформированную линзу, выполненную из плавленого кварца КУ-1, влияет, главным образом, изменение показателя преломления линзы.

Мощность $W = 20$ кВт.

Доля мощности в зависимости от угла ϕ и распределение излучения в дальней зоне приведены на рис. 10, 11. Расчеты включали термдеформацию формы поверхностей линзы и изменение показателя преломления в результате нагрева пучком мощностью 20 кВт.

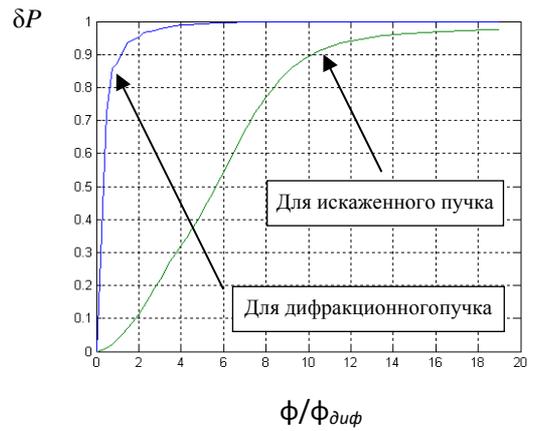


Рис. 10. Доля мощности в зависимости от угла

Из результатов расчетов, представленных на рис. 10, следует, что вследствие нагрева расходимость пучка, прошедшего через термдеформированную линзу, ухудшается до 9,5 дифракционных углов.

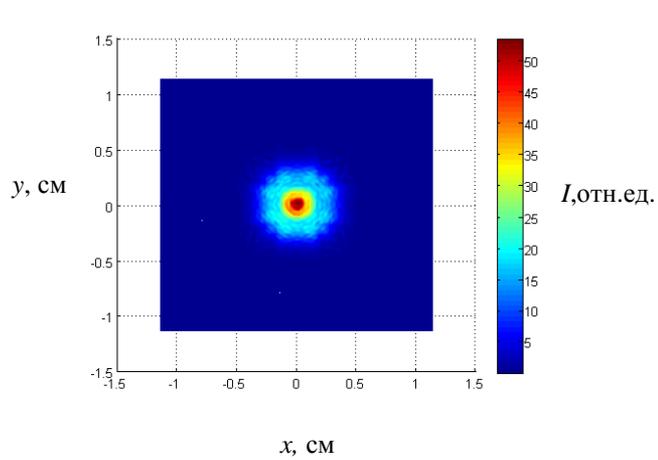


Рис. 11. Распределение интенсивности в дальней зоне линзы

Мощность $W = 5$ кВт.

Доля мощности в зависимости от угла ϕ и распределение излучения в дальней зоне приведены на рис. 12, 13. Расчеты включали термдеформацию формы поверхностей линзы и изменение показателя преломления в результате нагрева пучком мощностью 5 кВт.

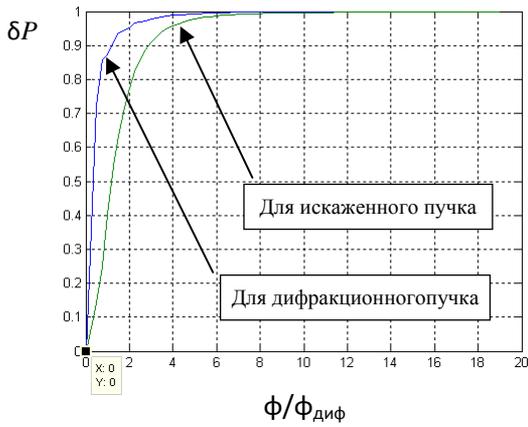


Рис. 12. Доля мощности в зависимости от угла

Из результатов расчетов, представленных на рис. 12, следует, что вследствие нагрева расходимость пучка, прошедшего через термдеформированную линзу, ухудшается до 2,8 дифракционных углов.

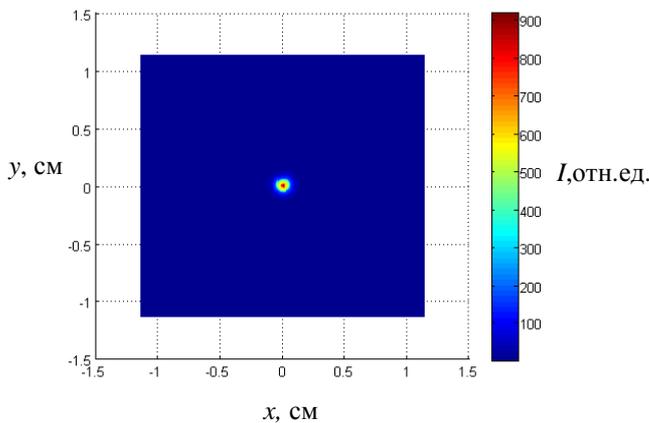


Рис. 13. Распределение интенсивности в дальней зоне линзы

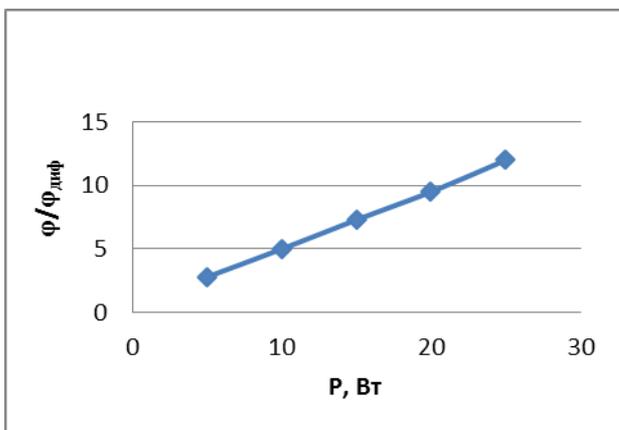


Рис. 14. Расходимость пучка в зависимости от мощности излучения

Обобщая результаты расчетов прохождения пучка через термдеформированную линзу и представляя зависимость расходимости пучка от мощности излучения на рис. 14, можно сделать вывод, что зависимость имеет практически линейный характер. Для рассматриваемого интервала мощностей лазерного излучения от 5 кВт до 25 кВт, наименьшая расходимость составляет 2,8 дифракционных угла при мощности лазерного излучения 5 кВт, наибольшая расходимость составляет 12 дифракционных углов при мощности лазерного излучения 25 кВт.

Заключение

В ходе работы было проведено расчетное моделирование деформации линзы в процессе нагрева вследствие поглощения лазерного излучения и динамики распределения температуры. Проведен расчет качества лазерного пучка, прошедшего через термдеформированную линзу, в зависимости от времени воздействия. Установлено, что на интервале мощностей от 5 кВт до 25 кВт для лазерного пучка диаметром 32 мм зависимость расходимости от мощности линейная. На данном интервале мощностей наибольшая расходимость лазерного пучка составила 12 дифракционных пределов при воздействии излучения мощностью 25 кВт, а наименьшая расходимость реализуется при воздействии излучения с мощностью 5 кВт и равна 2,8 дифракционных пределов.

Установлено, что основным фактором, определяющим качество оптического пучка, прошедшего через линзу, выполненную из плавленого кварца КУ-1, является изменение показателя преломления Δn вследствие нагрева.

Список литературы

1. Шрамко Ю. П. Оптико-механическая промышленность, 1972. Вып. 3, с. 34.