

3. Шепелевич, В.В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах / В.В. Шепелевич. – Минск : Изд. центр БГУ, 2012. – 254 с.
4. Кульчин, Ю.Н. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей / Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.А. Камшилин, Р.В. Ромашко. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 288 с.
5. Влияние обратного пьезоэлектрического эффекта и фотоупругости на когерентное взаимодействие гауссовых (1+1)D световых пучков в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ / А.А. Голуб, В.Н. Навныко, В.В. Давыдовская [и др.] // ЖПС. – 2025. – Т. 92, № 1. – С. 114–119.
6. Revealing of the flexoelectric parameters in cubic photorefractive crystals using two-beam coupling / S.M. Shandarov [et al.] // Photorefractive Photonics. – 2015.
7. Влох, О.Г. Явления пространственной дисперсии в параметрической кристаллооптике / О.Г. Влох. – Львов : Вища шк. Изд-во при Львов, ун-те, 1984. – 156 с.
8. Определение материальных параметров фоторефрактивных кристаллов на основе метода адаптивной голографической интерферометрии / С.М. Шандаров, А.О. Злобин, А.А. Шмидт [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129, № 4. – С. 413–417.
9. Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1982.
10. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах / С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 242 с.

УДК 669.71.535.241

П.С. Шаповалов

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЕЩЕСТВЕ ПРИ НАГРЕВЕ КРУГОВЫМ И КОЛЬЦЕВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ

Найдено путем дифференцирования эллиптического уравнения теплопроводности аналитическое распределение температуры в веществе при нагреве лазерного осесимметричного гауссова пучка произвольного профиля. Представлены распределение температуры обычного гауссова и кольцевого гауссова пучка.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, нагрев лазерным пучком, распределение температуры, круговой гауссов пучок.

В промышленном производстве широко применяются лазеры для различных технологических процессов. Лазеры находят применение для резки материалов, лазерной сварки, термообработки и наплавки [1]. Лазеры в первую очередь используются в промышленности в тех процессах, которые неосуществимы с помощью других способов, и

там, где применение лазера обеспечивает большую эффективность работы и большую производительность труда.

Для лучшей оптимизации использования лазеров в технологии нагрева и плавления вещества необходимо знать точное распределение температур в использованном материале в зависимости от распределения интенсивности света в поперечном сечении лазерного пучка. Важнейшей физической характеристикой процесса нагрева при воздействии лазерного излучения является распределение температурного поля в материале. Если распределение температуры в веществе известно для разных типов лазерных пучков, то это позволяет выбрать наиболее оптимальные и эффективные технологические режимы обработки материалов.

Для нахождения распределения температуры в веществе, создаваемом лазерным пучком, используем неоднородное эллиптическое уравнение теплопроводности [2]. Для нагрева вещества применяем осесимметричный лазерный пучок. Исходное уравнение в полярной системе координат имеет вид:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = -\frac{1}{\lambda} I(r), \quad (1)$$

где T – искомая функция распределения температуры в веществе, λ – коэффициент теплопроводности материала, $I(r)$ – поперечное распределение интенсивности света в лазерном пучке используемого в качестве теплового источника нагрева вещества, r – радиус полярной системы координат.

Лазерный тепловой источник представим в виде произведения круговой гауссовой функции на многочлен четной степени от r .

$$I = (C_0 + C_1 r^2 + C_2 r^4 + \dots + C_n r^{2n}) \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right). \quad (2)$$

Здесь w – радиус пучка. В случае $C_0 \neq 0$, а $C_i = 0$, ($i = \overline{1, n}$) имеем простейший гауссов круговой пучок, где C_0 – является интенсивностью лазерного излучения на оси пучка $r = 0$. Если $C_0 = 0$, а $C_i \neq 0$, то имеем произвольный кольцевой лазерный пучок. Такое представление теплового источника позволяет подобрать любую произвольную форму пучка с круговой симметрией.

Учитывая постановку задачи для решения уравнения (1), граничные условия могут быть записаны в виде:

$$T(r = b) = 0, \quad (3a)$$

$$\frac{dT(r = 0)}{dr} = 0. \quad (3б)$$

В первом граничном условии (3a) следует, что температура при удалении в поперечном направлении при $b \rightarrow \infty$ стремится к нулю. Второе граничное условие (3б) следует из круговой симметрии лазерного теплового источника при нагревании вещества.

Интегрируя дифференциальное уравнение (1), с учетом граничного условия (3б), получим

$$\frac{dT}{dr} = \frac{w^2}{4\lambda} re^{-\frac{2r^2}{w^2}} \sum_{k=1}^n C_k \left[r^{2k} + \sum_{i=1}^k k(k-1)\dots(k-i+1) \frac{w^{2i}}{2^i} r^{2(k-i)} \right]. \quad (4)$$

Повторно интегрируя исходное уравнение, с учетом первого граничного условия (3а), получим решение уравнения (4) в аналитическом виде:

$$T = -\frac{\lambda w^2}{8} \left[e^{-\frac{2r^2}{w^2}} \sum_{k=2}^n S_k(r) - e^{-\frac{2a^2}{w^2}} \sum_{k=2}^n S_k(b) + \left(Ei\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) - Ei\left(\frac{2b^2}{w^2}\right) - 2\ln(r) + 2\ln(b) \right) \times \sum_{k=1}^{n+1} (-1)^{k-1} \frac{C_{k-1} w^{2(n-1)}}{2^{k-1}} k(k-1)\dots 2 \cdot 1 \right], \quad (5)$$

где $S_k(r) = C_k \sum_{i=1}^k \left((-1)^{k-1} \frac{w^{2(r-i+1)} r^{2(i-1)}}{2^{r-i+1}} \sum_{m=i}^k \frac{1}{m} k(k-1)\dots(i+1)i \right)$, $Ei(x)$ –

интегральная показательная функция [3]. В случае, когда используется обыкновенный круговой гауссов пучок ($C_0 \neq 0, C_i = 0, i = \overline{1, n}$), распределение температурного поля имеет вид:

$$T = -\frac{\lambda w^2 C_0}{8} \left[Ei\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) - Ei\left(\frac{2b^2}{w^2}\right) - 2\ln\left(\frac{r}{b}\right) \right], \quad (6)$$

При численном исследовании решений (5, 6) использовались круговые и кольцевые гауссовы пучки (рисунок 1).

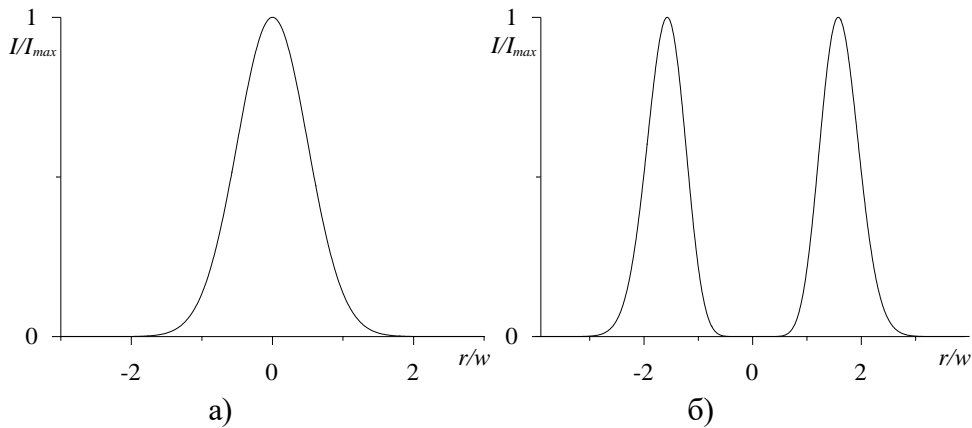


Рисунок 1 – Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении кругового (а) $C_0 \neq 0$ и кольцевого гауссова пучка (б) $C_0 = 0; C_1 \neq 0; C_i = 0$

Качественное распределение температурного поля при воздействии таких пучков на поверхность материала имеет вид:

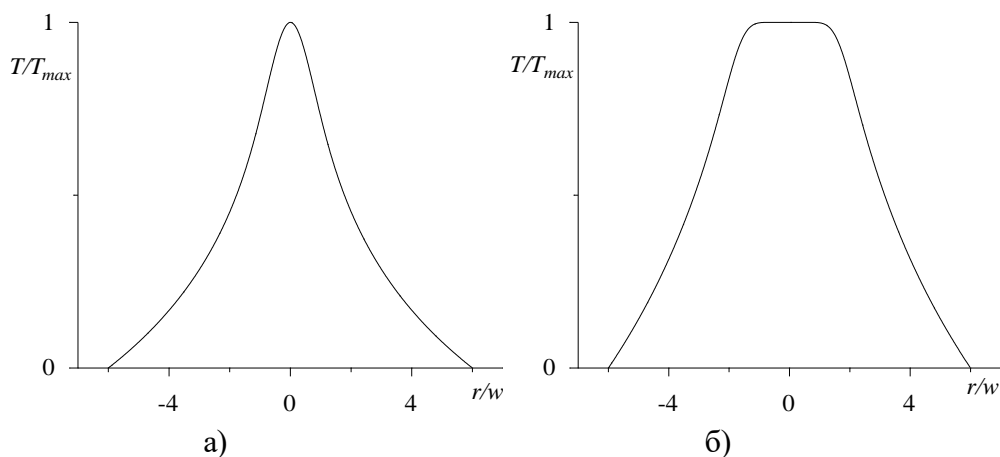


Рисунок 2 – Распределение температурного поля на поверхности материала при нагревании круговым (а) $C_0 \neq 0, b=6r/w$ и кольцевым гауссовым пучком (б) $C_1 \neq 0, b=6r/w$

Из рисунка 2, а следует, что использование кругового пучка приводит к более узкому отверстию в материале, и при одинаковой мощности с кольцевым пучком к более глубокому отверстию, что выгодно для резки материалов. Использование кольцевых пучков выгодно для равномерного нагрева и плавления (наплавки) материала.

Список использованных источников

1. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 663 с.
2. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы / А.А. Углов, И.Ю. Смуров, А.М. Лашин, А.Г. Гуськов. – М. : Наука, 1991. – 288 с.