

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ
ЧЕРЕЗ АЛМАЗНУЮ ДИФРАКЦИОННУЮ ЛИНЗУ С СУБВОЛНОВЫМИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПОГРЕШНОСТЯМИ МИКРОРЕЛЬЕФА**

Д.Л. Головашкин¹, М. Дюпарре², В.С. Павельев¹, В.А. Сойфер¹
¹ - Институт систем обработки изображений РАН,

² - Институт прикладной оптики Фридрих-Шиллер Университета (г. Йена, Германия)
E-mail: Dimitriy@smr.ru

Введение

Использование в промышленности мощных CO₂-лазеров (λ=10,6 мкм) обуславливает интерес к алмазным дифракционным элементам, предназначенным для фокусировки лазерного излучения в области различной конфигурации. В частности, в [1-3] исследовались дифракционные оптические элементы (ДОО) - фокусаторы и линзы, изготовленные прямым лазерным травлением поверхности алмазной пленки (n=2,4) путем селективной абляции с помощью эксимерного УФ-лазера.

Данный метод не позволяет формировать идеальный ступенчатый профиль дифракционного микрорельефа в силу особенностей технологии, что влечет за собой отклонения в работе ДОО от расчетных характеристик. Систематические локальные искажения микрорельефа ("бортики") возникают на границах элементарных областей травления [3] - областей, каждая из которых соответствует одному отсчету фазовой функции (рис. 1а, б).

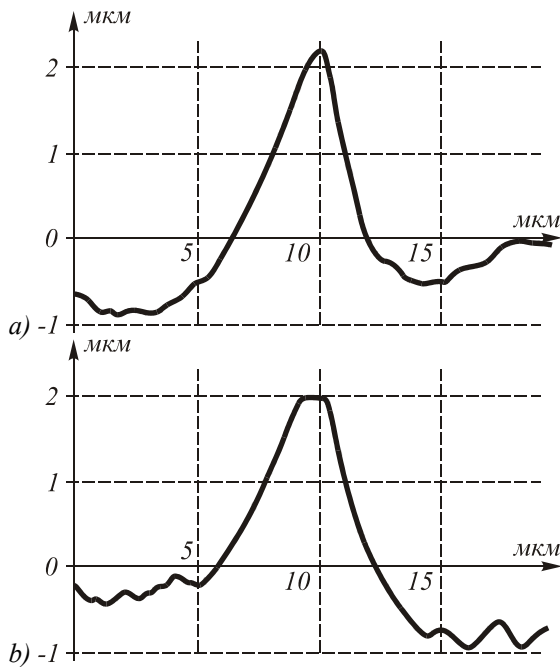


Рис.1. Вид локального искажения микрорельефа на стыке двух элементарных областей:
а) с одинаковыми глубинами травления;
б) с разными глубинами травления.

Информация о характерных размерах искажений-погрешностях была получена методами микроскопии. Субволновый характер погрешностей не позволяет использовать скалярное приближение для анализа их влияния. Изучение влияния субволновых погрешностей методом численного моделирования с

помощью разностной схемы для уравнений Максвелла является предметом рассмотрения предложенной работы. В качестве модельного примера выбиралась четырехуровневая цилиндрическая дифракционная линза.

Постановка вычислительных экспериментов

Для моделирования распространения H-волны через цилиндрическую дифракционную микролинзу предлагается явная разностная схема, аналогичная [4]:

$$\begin{aligned} \mu_0 \mu \frac{H_{y,j,k}^{n+1} - H_{y,j,k}^n}{h_t} &= - \frac{E_{x,j,k}^n - E_{x,j,k-1}^n}{h_z}; \\ \mu_0 \mu \frac{H_{z,j,k}^{n+1} - H_{z,j,k}^n}{h_t} &= \frac{E_{x,j,k}^n - E_{x,j,k-1}^n}{h_y}; \\ \varepsilon_0 \varepsilon \frac{E_{x,j,k}^{n+1} - E_{x,j,k}^n}{h_t} &= \frac{H_{z,j,k+1}^{n+1} - H_{z,j,k}^{n+1}}{h_y} - \\ &- \frac{H_{y,j,k+1}^{n+1} - H_{y,j,k}^{n+1}}{h_z}. \end{aligned}$$

Проекции компонент электромагнитного поля на оси декартовой системы координат $E_{x,j,k}^n, H_{y,j,k}^n, H_{z,j,k}^n$ определены на сетке $\Omega_h = \{(y_j, z_k, t_n) \in \Omega\}$, в области $\Omega = \{0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_z, 0 \leq t \leq T\}$ (рис. 2). Набор индексов j, k, n задает узлы сетки Ω_h , причем $1 \leq j \leq N_y, 1 \leq k \leq N_z, 1 \leq n \leq N_t$, где целочисленные положительные константы N_y, N_z, N_t определяют общее число узлов. Шаги сетки $h_y = L_y/N_y, h_z = L_z/N_z, h_t = T/N_t$. Относительная электрическая и магнитная проницаемости являются функциями координат: $\varepsilon = \varepsilon(y_j, z_k), \mu = \mu(y_j, z_k)$. Предложенная схема аппроксимирует уравнения Максвелла с первым порядком по пространству и времени, будучи устойчивой при условии $h_t \leq c^{-1} [(h_y)^{-2} + (h_z)^{-2}]^{-1/2}$.

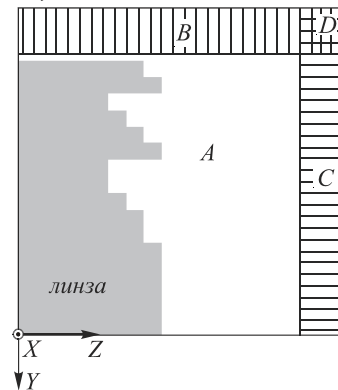


Рис.2. Область Ω.

Особое внимание при записи схемы уделялось постановке граничных условий. Область моделирования (A) с трех сторон ограничивалась совершенно поглощающим слоем [5] (B, C, D), необходимым для имитации вакуума вокруг области A . Основная идея метода совершенно поглощающего слоя состоит в введении в уравнения Максвелла наряду с электрической проводимостью среды (σ_y, σ_z) фиктивной магнитной проводимости (σ_y^*, σ_z^*) таким образом, чтобы импеданс среды соответствовал импедансу вакуума $\sigma/\varepsilon_0 = \sigma^*/\mu_0$.

Тогда в области B схема запишется как:

$$H_{zj,k}^{n+1} = \exp(-\sigma_{y_j}^* h_t / \mu_0) H_{zj,k}^n + \frac{(1 - \exp(-\sigma_{y_j}^* h_t / \mu_0))}{\sigma_{z_k}^* h_y} \times \quad (1)$$

$$\times \left(E_{xy,j,k}^n + E_{xz,j,k}^n - E_{xy,j-1,k}^n - E_{xz,j-1,k}^n \right),$$

$$\mu_0 \mu \frac{H_{y,j,k}^{n+1} - H_{y,j,k}^n}{h_t} = - \frac{\left(E_{xy,j,k}^n + E_{xz,j,k}^n \right) - \left(E_{xy,j,k-1}^n + E_{xz,j,k-1}^n \right)}{h_z},$$

$$\varepsilon_0 \varepsilon \frac{E_{xy,j,k}^{n+1} - E_{xy,j,k}^n}{h_t} = - \frac{H_{y,j,k+1}^{n+1} - H_{y,j,k}^{n+1}}{h_z},$$

$$E_{xz,j,k}^{n+1} = \exp(-\sigma_{y_j} h_t / \varepsilon_0) E_{xz,j,k}^{n+1} + \frac{(1 - \exp(-\sigma_{y_j} h_t / \varepsilon_0))}{\sigma_{y_j} h_y} \left(H_{zj,k+1}^{n+1} - H_{zj,k}^{n+1} \right) \quad (2)$$

В области C схема принимает вид:

$$H_{y,j,k}^{n+1} = \exp(-\sigma_{z_k}^* h_t / \mu_0) H_{y,j,k}^n - \frac{(1 - \exp(-\sigma_{z_k}^* h_t / \mu_0))}{\sigma_{z_k}^* h_z} \times \quad (3)$$

$$\times \left(E_{xy,j,k}^n + E_{xz,j,k}^n - E_{xy,j,k-1}^n - E_{xz,j,k-1}^n \right),$$

$$\mu_0 \mu \frac{H_{zj,k}^{n+1} - H_{zj,k}^n}{h_t} = \frac{\left(E_{xy,j,k}^n + E_{xz,j,k}^n \right) - \left(E_{xy,j-1,k}^n + E_{xz,j-1,k}^n \right)}{h_y},$$

$$E_{xy,j,k}^{n+1} = \exp(-\sigma_{z_k} h_t / \varepsilon_0) E_{xy,j,k}^{n+1} - \frac{(1 - \exp(-\sigma_{z_k} h_t / \varepsilon_0))}{\sigma_{z_k} h_z} \left(H_{y,j,k+1}^{n+1} - H_{y,j,k}^{n+1} \right), \quad (4)$$

$$\varepsilon_0 \varepsilon \frac{E_{xz,j,k}^{n+1} - E_{xz,j,k}^n}{h_t} = \frac{H_{zj,k+1}^{n+1} - H_{zj,k}^{n+1}}{h_y}.$$

И в области D схема состоит из уравнений (1); (2); (3); (4).

В свою очередь области B, C и D граничат с электрической стенкой, которой соответствуют условия первого рода (для тангенциальной проекции электрического и нормальной проекции магнитного поля) и условия второго рода (для нормальной проекции электрического и тангенциальной проекции магнитного поля).

Прямой $z=L_z$ (главной оптической оси линзы) соответствует магнитная стенка, задающая условия первого рода для H_z и условия второго рода для E_x и H_y . Такое представление граничных условий позволяет рассматривать половину дифракционной линзы, учитывая ее симметричность относительно главной оптической оси.

На прямой $z=0$ задаются условия первого рода, соответствующие распространяющейся в линзе электромагнитной волне.

Были поставлены три серии вычислительных экспериментов, в которых исследовалась четырехуровневая дифракционная линза с фокусным расстоянием $f=4,5$ мм и апертурой $L_y \times 2=1$ мм. Каждой серии экспериментов соответствовала линза с линейным размером элементарной области травления $s=30$ мкм, $s=40$ мкм и $s=60$ мкм. Протяженность области Ω по координате Z и время постановки эксперимента выбирались так, чтобы отразившаяся от дифракционного рельефа волна не успела дойти до прямой $y=0$, а через линзу прошел пучок длиной не менее 5λ . Тогда $L_z=106$ мкм и $T=7,12813 \times 10^{-13}$ с. Предполагалось, что линза освещается нормально падающим гауссовым пучком с радиусом перетяжки $w=30\lambda$.

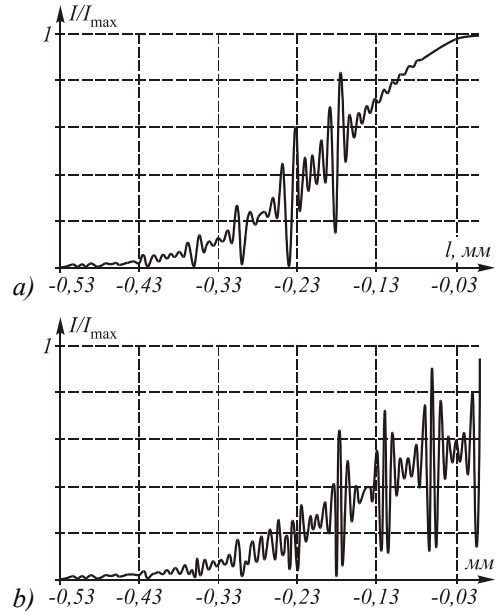


Рис. 3. Распределения интенсивности $I = |\dot{E}|^2$ в плоскости за линзой при $s=60$ мкм а) без локальных искажений микрорельефа, б) с искажениями.

Целью первого эксперимента каждой серии было получение распределения комплексной амплитуды волны \dot{E} [6] в плоскости за линзой без ло-

кальных искажений микрорельефа, второго эксперимента - с искажениями (рис. 3).

Осцилляции интенсивности на рис. 3а вызваны ступенчатым характером расчетного микрорельефа. Локальные технологические искажения микрорельефа приводят к увеличению частоты осцилляций (рис. 3б). Впоследствии с помощью интеграла Кирхгофа [7] рассчитывались распределения интенсивности в фокальных плоскостях линз (рис. 4).

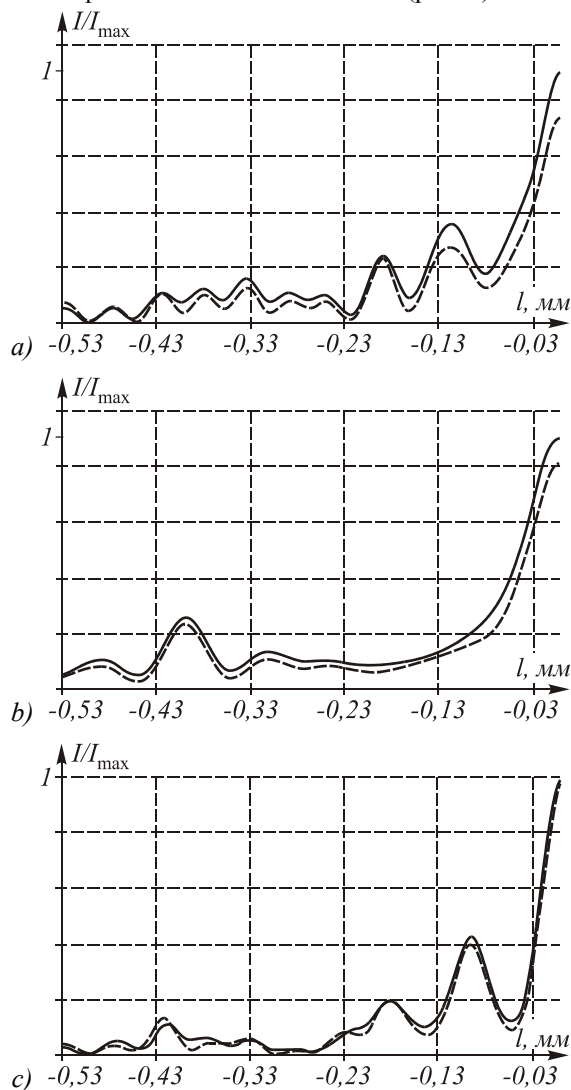


Рис. 4. Распределения интенсивности

$I = |\dot{E}|^2$ в фокальной плоскости для линз с линейным

размером элементарной области травления

a) $s=30$ мкм, б) $s=40$ мкм, в) $s=60$ мкм.

Черная кривая соответствует линзе без искажений, пунктирная - с искажениями.

Анализ результатов

Условимся под эффективностью линзы с локальными искажениями микрорельефа \mathcal{E} понимать отношение энергии, попавшей в центральный максимум в фокальной плоскости такой линзы, к энергии, попавшей в центральный максимум в фокальной плоскости линзы без искажений.

Как видно из анализа (рис. 4), эффективность линзы с локальными искажениями микрорельефа возрастает при увеличении линейного размера элементарной области травления s . Так, если для линзы с $s=30$ мкм $\mathcal{E}=0,78$, то для линзы с $s=40$ мкм - $\mathcal{E}=0,81$, а для линзы с $s=60$ мкм - $\mathcal{E}=0,91$. Это связано с уменьшением доли непроработанных областей в общей площади линзы. Отметим, однако, что увеличение размера элементарной области травления ведет к снижению точности аппроксимации расчетной непрерывной фазовой функции линзы ее дискретным аналогом [8].

Литература:

1. Кононенко В.В., Конов В.И., Пименов С.М., Прохоров А.М., Павельев В.С., Соيفер В.А. Алмазная дифракционная оптика для мощных CO₂-лазеров // Квантовая электроника. 1999. Т. 26, С. 9-10.
2. V.V. Kononenko, V.I. Konov, S.M. Pimenov, A.M. Prokhorov, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer CVD diamond transmissive diffractive optics for CO₂ lasers // New Diamond Films and Frontier Carbon Technology, Japan. V. 10, № 2. 2000 (accepted for publication).
3. V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, V.V. Kononenko, V.I. Konov, S.M. Pimenov, A.M. Prokhorov, B. Luedge, M. Duparre Diamond focusators for far IR lasers // МЦНТИ. Компьютерная оптика. № 20. С. 71-75, 2000.
4. Hiroyuki Ichikawa, Electromagnetic analysis of diffraction gratings by the finite-difference time-domain method // J. Opt. Soc. Am. 1998. V. 15, № 1. P. 152-157.
5. Jean-Pierre Berenger, A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // Journal of computational physics. 1994. № 114. P 185-200.
6. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн // М., Наука. 1989. 540 с.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики // Пер. с англ. М., Наука. 1973. 720 с.
8. Методы компьютерной оптики // Под ред. В.А. Соифера. М., Физматлит, 2000. 688с.

Simulation of IR beams transmission through a diamond diffractive lens with subwavelength technological errors of the microrelief

D.L. Golovashkin¹, M. Duparre², V.S. Pavelyev¹, V.A. Soifer¹

¹Image Processing Systems Institute of RAS, Samara

²Institute of Applied Optics, Friedrich Schiller University (Jena, Germany)

Abstract

The industrial application of high-power CO₂ lasers ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) gives rise to the interest in diamond diffractive elements intended for focusing laser radiation to the areas of various configurations. In particular, the works [1-3] analyzed the diffractive optical elements (DOEs) - focusators and lenses produced by direct laser etching of a diamond film surface ($n = 2.4$) by selective ablation using an excimer UV laser. This method does not allow to form an ideal stepped profile of the diffraction microrelief due to the peculiarities of the technology, which leads to deviations from the DOE design characteristics. Systematic local microrelief distortions appear at the boundaries of elementary etching areas. The subject of this work is the study of the influence of subwavelength errors by the method of numerical simulation using the difference scheme for Maxwell's equations. A four-level cylindrical diffractive lens was selected as an example.

Citation: Golovashkin DL, Duparre M, Pavelyev VS, Soifer VA. Simulation of IR beams transmission through a diamond diffractive lens with subwavelength technological errors of the microrelief. *Computer Optics* 2001; 21: 131-133.

References

- [1] Kononenko VV, Konov VI, Pimenov SM, Prokhorov AM, Pavelyev VS, Soifer VA. Diamond diffractive optical elements for high-power CO₂ lasers. *Sov J Quantum Electron* 1999; 26: 9-10.
- [2] Kononenko VV, Konov VI, Pimenov SM, Prokhorov AM, Pavelyev VS, Soifer VA. CVD diamond transmissive diffractive optics for CO₂ lasers. *New Diamond Films and Frontier Carbon Technology* 2000; 10(2) (accepted for publication).
- [3] Pavelyev VS, Soifer VA, Kononenko VV, Konov VI, Pimenov SM, Prokhorov AM, Luedge B, Duparre M. Diamond focusators for far IR lasers. *Computer Optics* 2000; 20: 71-75.
- [4] Ichikawa H. Electromagnetic analysis of diffraction gratings by the finite-difference timedomain method. *J Opt Soc Am* 1998; 15(1): 152-157.
- [5] Berenger J-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J Comput Phys* 1994; 114: 185-200.
- [6] Nikolsky VV, Nikolskaya TI. *Electrodynamics and radio waves propagation*. Moscow: Nauka Publisher; 1989: 540.
- [7] Born M, Wolf E. *Basics of optics*. Moscow: "Nauka" Publisher; 1973.
- [8] Soifer VA, ed. *Methods of computer optics [In Russian]*. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2000.