01; 07

ДИФРАКЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ФОКУСАТОРОВ В ПРОДОЛЬНЫЙ ОТРЕЗОК

В.В. Котляр, В.А. Сойфер,
С.Н. Хонина

Фокусатором в продольный отрезок [1] называют фазовый оптический элемент, который в паре со сферической линзой формирует световое поле, имеющее увеличенный в продольном направлении фокальный объем. Такие оптические элементы можно также рассматривать как обобщенные аксиконы [2]. Метод расчета фазовой функции таких фокусаторов, основанный на использовании уравнения лучей в геометрической оптике [1, 2], не учитывает расширение лучевых трубок и их взаимное перекрытие, то есть не учитывает дифракционных эффектов. Это приводит к тому, что расчитанные таким методом фокусаторы формируют световой продольный отрезок, отличный от требуемого по интенсивности в среднем на 30-40 процентов [3].

В данной работе предлагается дифракционный метод расчете фазовой функции фокусатора в продольный отрезок. Метод позволяет рассчитывать фокусаторы, формирующие продольные световые отрезки с произвольным распределением интенсивности вдоль этих отрезков и отличающиеся от требуемых в среднем на 1–10 процентов.

Пусть требуется рассчитать радиальную фазовую функцию $\varphi(r)$ оптического элемента, формирующего световой отрезок вдоль оптической оси, ограниченный точками z_1 и z_2, с произвольным распределением интенсивности $I(z)$, $z \in [z_1, z_2]$. В скалярном приближении дифракции Френеля комплексная амплитуда света $F(\rho, z)$ на расстоянии z от оптического элемента рассчитывается по формуле

$$F(\rho,z)=\frac{k}{z}e^{i\frac{k}{2z}\rho^2}\int\limits_0^R e^{i\varphi(r)}e^{i\frac{k}{2z}r^2}J_0\left(\frac{k}{z}r\rho\right)rdr, \tag{1}$$

где k – волновое число света, R – радиус фокусатора, r, ρ – радиальные переменные в плоскости фокусатора и наблюдения, соответственно, $J_0(x)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Комплексная амплитуда света на оптической оси при $\rho=0$ рассчитывается по формуле

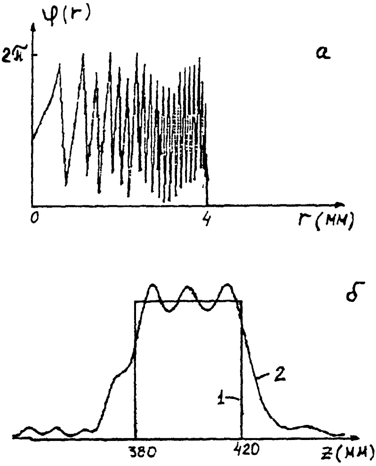

Рис. 1. а – рассчитанная за 57 итераций фаза фокусатора в продольный отрезок, б – рассчитанная для данного фокусатора интенсивность вдоль оси (кривая 2) и требуемая интенсивность (кривая 1).

$$F(0,z)=\frac{k}{z}\int_0^R e^{i\varphi(r)}e^{i\frac{k}{2z}r^2}r\,dr. \qquad (2)$$

Введя новые переменные

$$\xi=\frac{k}{z}, \quad x=\frac{r^2}{2},$$

вместо (2) можно записать

$$\tilde{F}(\xi)=\int_0^{x_0} e^{i\varphi(x)}e^{ix\xi}dx, \quad x_0=\frac{R^2}{2}. \qquad (3)$$

Из (3) видно, что комплексная амплитуда света за фокусатором $exp[i\varphi(x)]$ связана с комплексной амплитудой света на оптической оси $\tilde{F}(\xi)$ преобразованием Фурье.

Далее, для расчета функции $\varphi(r)$ предлагается применять итеративный алгоритм Герчберга–Секстона [4], который последовательными приближениями решает интегральное уравнение (3). На n-ом шаге итераций рассчитанную в плоскости фокусатора комп–

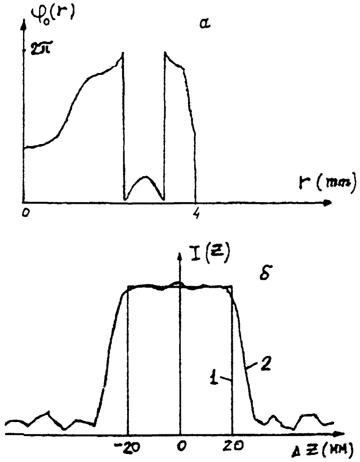

Рис. 2. а – рассчитанная за 57 итераций фаза фокусатора в продольный отрезок как дополнение к линзе, б – рассчитанная для данного фокусатора интенсивность вдоль оси (кривая 2) и требуемая интенсивность (кривая 1).

лексную амплитуду света $f_n(x)$ следует заменить на функцию $f_n'(x)$ по правилу

$$f_n'(x)=\begin{cases} f_n(x)|f_n(x)|^{-1}, & x\in[0,x_0] \\ 0, & x\notin[0,x_0], \end{cases} \tag{4}$$

а рассчитанную амплитуду $\tilde{F}_n(\xi)$ на оптической оси следует заменить на функцию $F_n'(\xi)$ по правилу

$$F_n'(\xi)=\begin{cases} \sqrt{I(\xi)}\tilde{F}_n(\xi)|\tilde{F}_n(\xi)|^{-1}, & \xi\in[\xi_1,\xi_2] \\ 0, & \xi\notin[\xi_1,\xi_2], \end{cases} \tag{5}$$

где $I(\xi)$ – требуемая интенсивность света вдоль оси z, $\xi_1 = \frac{k}{z_2}$, $\xi_2=\frac{k}{z_1}$.

Рассчитанная по формуле (3) фаза $\varphi(r)$ будет содержать квадратичное слагаемое, описывающее сферическую линзу. Если же трубется рассчитать фокусатор в продольный отрезок как дополнение к сферической лизне, то представим $\varphi(r)$ в виде

$$\varphi(r)=\varphi_0(r)-\frac{k}{2f}r^2, \tag{6}$$

выделив явно квадратичное слагаемое. Если имеет место условие $(z_2 - z_1) \ll f$, то вместо (2) можно записать

$$F(0,\Delta z) = \frac{k}{f}\int\limits_0^R e^{i\varphi_0(r)} e^{i\frac{k\Delta z}{2f^2}r^2} r\,dr, \qquad (7)$$

где $\Delta z \in [z_1, z_2]$, f – фокусное расстояние линзы. Соотношение (7) с помощью замены переменных $\xi = \frac{k\Delta z}{f^2}$, $x = \frac{r^2}{2}$ сводится к преобразованию Фурье, аналогичному (3). Далее для расчета фазовой функции фокусатора $\varphi_0(r)$ применяется итеративный процесс с заменами (4), (5).

Предложенный метод апробировался численно. На рис. 1, а показана фаза фокусатора $\varphi(r)$, рассчитанная по формулам (2)-(5) за 57 итераций. Такой фокусатор формирует продольный световой отрезок с постоянной интенсивностью. На ирис. 1, б показано распределение интенсивности вдоль оптической оси (кривая 1 – требуемая интенсивность, кривая 2 – интенсивность, сформированная фокусатором). Парметры численного эксперимента следующие: N =256 – число отсчетов на фокусаторе, R =4 мм – его радиус. k =10^4 мм$^{-1}$, z_1=380 мм, z_2=420 мм. Энергетическая эффективность фокусировки – 73 %, среднеквадратичное отклонение требуемой интенсивности от рассчитанной – 11 %.

На рис. 2, а показана фаза $\varphi_0(r)$, рассчитанная по формулам (7), (4), (5) за 57 итераций. Этот фокусатор совместно с линзой с фокусным расстоянием f =400 мм формирует световой отрезок с постоянной интенсивностью (кривая 2 на рис. 2, б). Эффективность фокусировки – 73 %, среднее отклонение – 2 %. Заметим, что такой высокой точности (два процента) удалось добиться с помощью адаптивной процедуры подстройки, используемой в алгоритме Герчберга-Секстона на каждом шаге итераций [5].

Список литературы

[1] Голуб М.А., Карпеев С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 10. С. 618.

[2] Пальчикова И.Г. //Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 1989. В. 6. С. 9.

[3] Казанский Н.Л.//Компьютерная оптика, М.: МЦНТИ. 1987. В. 1. С. 90.

[4] Gerchberg R.W., Saxton W.D. // Optik. 1972. V. 35. P. 237.

[5] Kotlyar V.V., Nikolsky I.V., Soifer V.A. // Optik. 1991. V. 88. P. 17.

Поступило в Редакцию
4 декабря 1991 г.