

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА, ФОКУСИРУЮЩЕГО В КОЛЬЦО

Оптический элемент, фокусирующий когерентное излучение в кольцо, открывает новые возможности для лазерной технологии сварки круговых швов, резки и сверления материалов. Теоретическое исследование и вычислительный эксперимент с фокусатором в кольцо проведены в работах [1,2]. В данной работе сообщается о реализации по технологии плоской оптики и описываются экспериментальные исследования фокусатора в кольцо с помощью автоматизированного оптико-цифрового комплекса, созданного на базе микроЭВМ и аппаратуры в стандарте КАМАК.

Для изготовления плоского фокусирующего элемента производился расчет на ЕС ЭВМ отсчетов его фазовой функции

$$\varphi(r) = k(\sqrt{f_0^2 + r^2} - \sqrt{f_0^2 + (r - r_0)^2}), \quad (1)$$

где

r - полярный радиус в плоскости элемента;

f_0 - фокусное расстояние;

r_0 - радиус кольца;

$k=2\pi/\lambda$ - волновое число;

λ -- длина волны.

Затем квадратная матрица отсчетов записывалась на магнитную ленту, используемую для вычерчивания негативного полутонового фотошаблона на прецизионном фотопостроителе "Ромб" с разрешением 25 мкм. После контактного копирования фотошаблона на фотопластинки "Микрат" и отбеливания был получен элемент с непрерывным фазовым рельефом, имеющий диаметр $2a = 25,6$ мм и параметры $\lambda = 0,63$ мкм, $f_0 = 300$ мм, $r_0 = 1$ мм.

В экспериментальном исследовании плоского оптического элемента ставились задачи регистрации распределения интенсивности в фокальной плоскости, оценки ширины формируемого кольца, а также подсчета доли светового потока, направляемого в кольцо заданной ширины, то есть энергетической эффективности. Для проведения эксперимента создан автоматизированный оптико-цифровой комплекс, позволяющий ввести информацию о распределении энергии в фокальной плоскости оптической системы в память управляющей ЭВМ, обработать ее и отобразить графики распределения энергии на телевизионном полутоновом дисплее или зарегистрировать эти графики на планшетном графопостроителе.

Оптическая система комплекса (рис. 1) содержит лазер типа ЛГ-79-1, регулятор интенсивности на базе поляроида П, формирователь сферического пучка на базе объективов O_1 , O_2 и диафрагмы Д. Фокусирующий элемент Ф преобразует сферический сходящийся пучок таким образом, что в фокальной плоскости имеет место характерное распределение излучения - кольцо, имеющее заданный радиус, ширину и интенсивность.

Преобразование фокального распределения интенсивности в электрический сигнал осуществляется фотоприемником в виде линейки ПЗС с 1024 светочувствительными элементами размером $\delta \times \delta$ каждый, $\delta = 15$ мкм. ПЗС-линейка установлена на горизонтальном двухкоординатном микрометрическом столике. Электронная часть комплекса

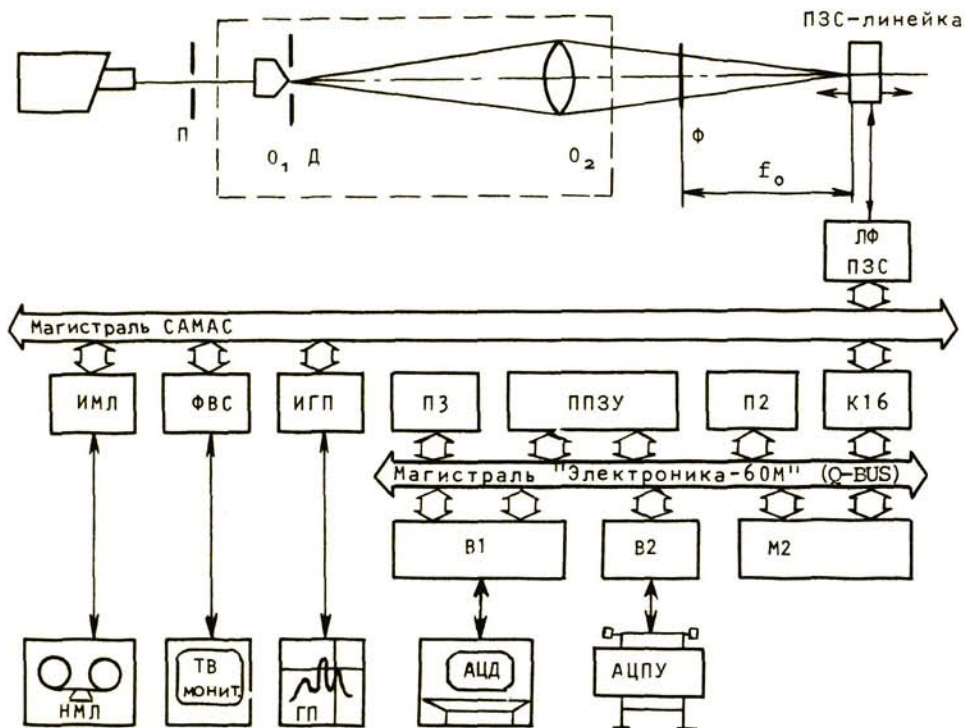


Рис. 1. Автоматизированная оптическая система для исследования фокусирующего элемента

(см. рис. 1) выполнена на базе микроЭВМ "Электроника-60М", аппаратуры в стандарте КАМАК и располагается в одной стойке. Модуль ФПЗС [3], управляющий работой ПЗС-линейки, задает режимы работы, производит аналогово-цифровое преобразование электрического сигнала в восьмиразрядный двоичный код, занесение в буферную память и выдачу данных на магистраль КАМАК.

Информация обрабатывается процессором М2 микроЭВМ "Электроника-60М". Промежуточные результаты и программы хранятся в ОЗУ, собранном на платах ПЗ, П2, драйверы внешних устройств записаны в ППЗУ. Для хранения и загрузки системы QOE, программ управления экспериментом и обработки экспериментальных данных, самих данных эксперимента в состав комплекса включен накопитель на магнитной ленте НМЛ типа ИЗОТ-5003 с модулем управления ИМЛ (интерфейс магнитной ленты). Графический телевизионный монитор (ТВ) и графопостроитель (ГП) подключены через соответствующие модули ФВС (формирователь видеосигнала) и ИГП (интерфейс графопостроителя). Программы обслуживания заносятся в ППЗУ управляющей микроЭВМ.

Программное обеспечение комплекса написано на языке высокого уровня QUASIC/F [4], компилятор которого при минимальном объеме занимаемой оперативной памяти (4 Кбайт) обеспечивает непосредственную работу с модулями КАМАК, поддерживает арифметику с плавающей точкой процессора М2.

Программное обеспечение комплекса состоит из управляющей головной программы и ряда подпрограмм, вызываемых в диалоговом режиме командами головной программы.

Комплекс содержит следующие подпрограммы:

- НР - вывод на экран дисплея справочной информации;
- ID - ввод данных с ПЗС-линейки;

- WR - вывод данных на дисплей;
- UR - вывод элементов, значения которых не меньше заданного уровня;
- PL - вывод данных на графопостроитель;
- NI - выбор рабочей зоны ПЗС-линейки;
- NP - учет потерь из-за неэффективности переноса информационных зарядов в ПЗС-линейке;
- OT - вычисление энергетической эффективности оптического элемента;
- MB - масштабирование данных;
- VD - вывод данных на экран ТВ-монитора;
- ST - окончание программы, выход в среду QUASIC/F.

Эксперимент проводился следующим образом. На установке проводились $M=5$ испытаний плоского фокусирующего элемента Φ при помещении ПЗС-линейки в сечения фокальной области, отстоящие на расстояниях $z = -10; -5; 0; 5; 10$ мм от фокуса вдоль оптической оси. Подбор линейного участка чувствительности фотоприемника осуществлялся поляридом P . Для уменьшения погрешности измерения из-за неравномерности передачи заряда был использован участок ПЗС-линейки, состоящий из первых 256 элементов с номерами $n = \overline{N_{\min}, N_{\max}}$; $N_{\min} = 0$; $N_{\max} = 255$. Измеренное распределение интенсивности в цифровом виде передавалось в оперативную память ЭВМ. Для подавления геометрического шума перед каждым измерением производилось запоминание уровня шума ПЗС-линейки при нулевой освещенности. В процессе предварительной обработки на ЭВМ эти шумы вычитались из полного сигнала, а в память ЭВМ записывались отсчеты I_{nm} , $n = \overline{N_{\min}, N_{\max}}$; $m = \overline{1, M}$, распределения интенсивности $I(\rho, z)$ в точках

$$\rho = (n - N_C) \cdot \delta, \quad n = \overline{N_{\min}, N_{\max}} \quad (2)$$

сечений

$$z = (m - (M+1)/2) \cdot \Delta z, \quad m = \overline{1, M} \quad (3)$$

фокальной области, где

N_C - координата n центра кольца;

$\delta = 15$ мкм;

$\Delta z = 5$ мм.

В ходе цифровой обработки полученных фокальных распределений интенсивности для каждого сечения в начале определялись характерные границы кольца N_1, N_2 ; N_5, N_6 и центрального пятна N_3, N_4 по некоторому уровню θ ($\theta = 0,1$) спада интенсивности (рис. 2). Далее находилась координата n центра кольца

$$N_C = \frac{N_1 + N_2 + N_5 + N_6}{4}, \quad (4)$$

оценивался радиус кольца

$$\hat{r}_0 = \frac{N_5 + N_6 - N_1 - N_2}{4} \cdot \delta, \quad (5)$$

ширина кольца

$$\hat{\Delta\rho} = \frac{N_6 - N_5 + N_2 - N_1}{2} \cdot \delta \quad (6)$$

и ширина центрального пятна

$$\hat{\Delta} = (N_4 - N_3) \cdot \delta. \quad (7)$$

Затем вычислялась оценка доли $\hat{\epsilon}$ светового потока, попадающего на площадь кольца:

$$\hat{\epsilon} = \frac{\sum_{n=N_1}^{N_2} I_{nm} \cdot (N_C - n) + \sum_{n=N_5}^{N_6} I_{nm} \cdot (n - N_C)}{\sum_{n=N_{\min}}^{N_{\max}} I_{nm} \cdot |n - N_C|} \quad (8)$$

Аналогично оценивалась доля энергии, попадающей в центральное пятно:

$$\hat{\epsilon}_0 = \frac{\sum_{n=N_3}^{N_4} I_{nm} \cdot |n - N_C|}{\sum_{n=N_{\min}}^{N_{\max}} I_{nm} \cdot |n - N_C|} \quad (9)$$

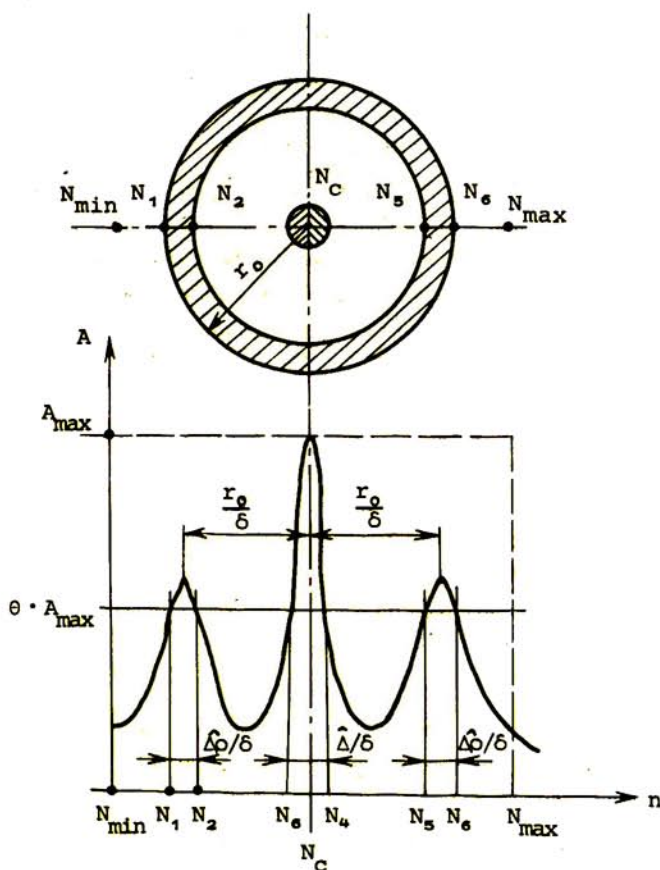


Рис. 2. Определение границ кольца

Полученные оценки параметров выдавались в виде таблиц на принтер и дисплей, а графики распределений интенсивности отображались на телевизионном мониторе и регистрировались графопостроителем.

В табл. 1 приведены измеренные значения границ N_i , $i = \overline{1,6}$ в пределах $N_{\min} = 0$ и $N_{\max} = 255$ для распределения интенсивности в фокальной плоскости. Видно, что ширина кольца $\hat{\Delta}_r$ составляет ~2-3 элемента ПЗС-линейки, то есть ~30-45 мкм, что хорошо согласуется с теоретическим значением, оцениваемом по формуле (35) работы [1],

$$\Delta_r = 5,31 \cdot \lambda \cdot \frac{\sqrt{f_0^2 + r_0^2}}{\pi a} \quad (10)$$

Измеренные границы кольца
в сечениях ($N_{\min} = 0$;
 $N_{\max} = 255$; $\theta = 0,1$)

N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
20	22	64	70	111	113

На рис. 3 приведен зарегистрированный в эксперименте график распределения интенсивности в фокальной области. На том же рисунке изображен соответствующий теоретический график.

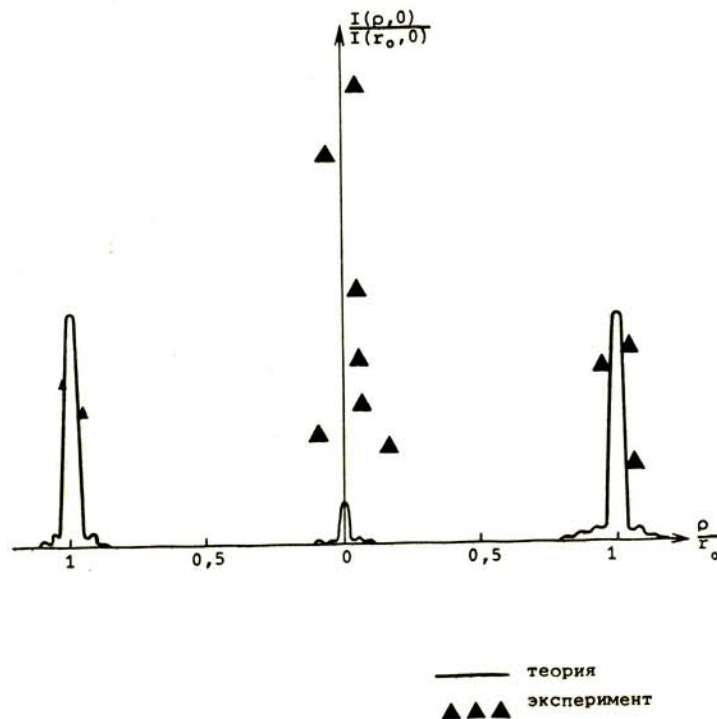


Рис. 3. Распределение интенсивности
в фокальной плоскости

Наблюдаемое в эксперименте существенное (~ 8 раз) увеличение интенсивности центрального пятна по сравнению с теоретической обусловлено падением дифракционной эффективности фокусатора из-за погрешностей технологии формирования фазового рельефа, а также рассеянием света на зерне эмульсии фокусатора и неудовлетворительным качеством стеклянной подложки. При этом вследствие малой площади доля его светового потока составляет всего $\sim 10\%$ (табл. 2). Интересный результат дает дальнейший анализ данных табл. 2. В фокальной плоскости ($z=0$) максимума достигает лишь световой поток \hat{E} в кольце. Напротив, световой поток центрального пятна \hat{E}_0 достигает максимума в следующем сечении, отстоящем на 5 мм от плоскости $z=0$ вперед по ходу распространения света. Данный факт качественно согласуется с теоретическим предсказанием [1], согласно которому цент-

Таблица 2

Измеренная энергетическая
эффективность фокусатора в кольцо

z , мм	-10	-5	0	5	10
$\hat{\epsilon}$	0,911	0,951	0,960	0,870	0,927
$\hat{\epsilon}_q$	0,089	0,049	0,040	0,130	0,073

ральное пятно фокусируется за фокальной плоскостью в плоскости $z=z_0$ (см. (11) в [1]), где

$$z_0 = \sqrt{f_0^2 + r_0^2} - f_0 \cong \frac{r_0^2}{2f_0} \approx 1,7 \text{ мкм.} \quad (11)$$

Расхождение значений z_0 и Δz обусловлено дискретностью сечений фокальной области и погрешностью определения фокальной плоскости вследствие аберраций фокусируемого пучка когерентного излучения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соيفер В.А., Харитонов С.И. Дифракционный расчет оптического элемента, фокусирующего в кольцо // Автометрия, 1987, № 6, с. 8-15.
2. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Соифер В.А. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики // Автометрия, 1988, № 1, с. 70-82.
3. Уваров Г.В. ФПЭС - контроллер в стандарте КАМАК // Фотозлектронические и волоконно-оптические преобразователи для систем управления и вычислительной техники. Куйбышев: КуАИ, 1986.
4. Подольский Л.И. Система QUASIC для программирования на мини-ЭВМ // Материалы по математическому обеспечению ЭВМ. Пушино: АН СССР, 1974.