

## РАСЧЕТНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Г. И. Грейсх, М. А. Прохоров и Ю. Г. Туркевич

Приведены результаты расчета на ЭВМ распределения качества по полю действительного изображения осевых голографических линз. Оценка качества производилась по семи основным критериям: Рэлея, Марешаля, Штреля и критериям, оценивающим качество по параметрам фигуры рассеяния, получаемой при расчете хода лучей через оптическую систему. Сделаны выводы о сопоставимости оценок качества оптического изображения по различным критериям.

Использование голограмм в качестве оптических элементов — линз, мультипликаторов, фурье-преобразователей — требует достоверного прогнозирования качества создаваемого ими изображения на этапе конструирования.

Известен ряд расчетных критериев оценки качества оптических систем. Прежде всего это критерии, оценивающие качество по волновой абберрации системы. Так, условие Рэлея [1] оценивает качество по максимальной величине волновой абберрации на краю апертуры, критерий Марешаля [2] — по величине среднеквадратичного отклонения волнового фронта от опорной сферы, интенсивность Штреля [3], оценивающая качество по величине нормированной интенсивности света в максимуме дифракционного пятна, также вычисляется по известной функции волновой абберрации. Другая группа критериев оценивает качество изображения по параметрам фигуры рассеяния, получаемой при расчете хода лучей через оптическую систему [4]. Эти критерии в настоящей работе использовались в виде

$$Q_1 = \frac{1}{N\delta} \sum_1^N |r_i|, \quad Q_2 = \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N r_i^2},$$

$$Q_3 = \frac{\delta}{N} \sum_1^N \frac{1}{|r_i| + \delta}, \quad Q_4 = \delta \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N \frac{1}{(|r_i| + \delta)^2}},$$

где  $\delta$  — радиус диска Эйри дифракционно ограниченной линзы,  $r_i$  — расстояние между точкой пересечения  $i$ -го луча с предметной плоскостью и центром сферы Гаусса.

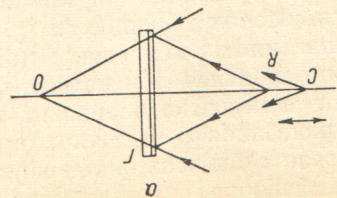
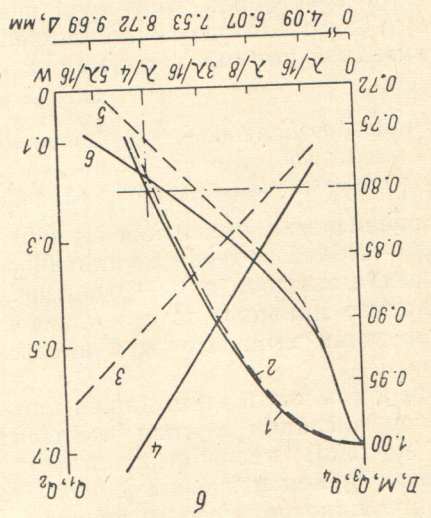
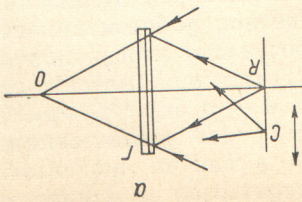
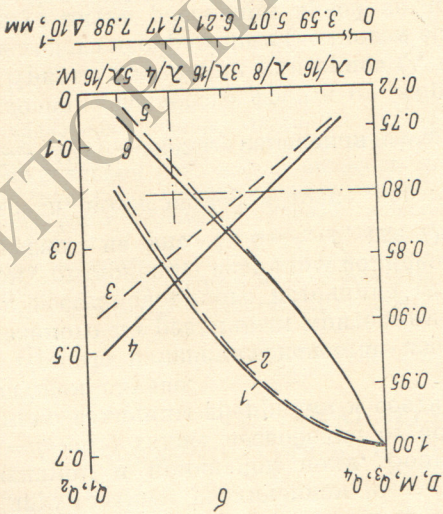
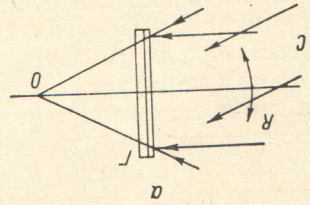
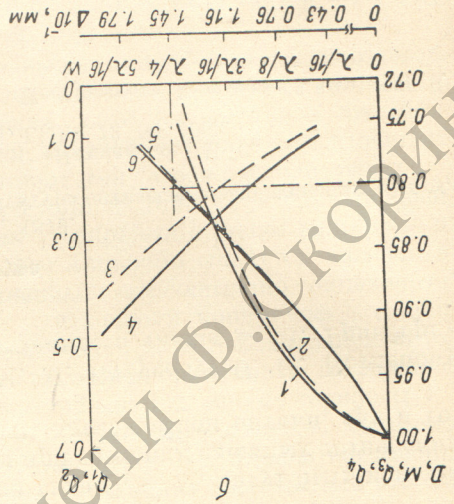
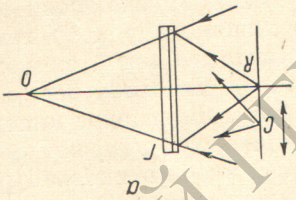
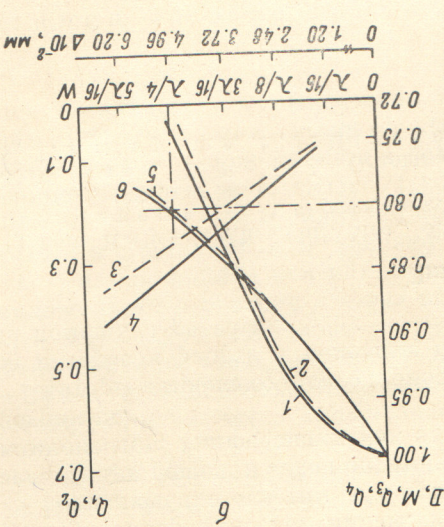
В зависимости от структуры рассчитываемой оптической системы возможно использование различных критериев, поэтому несомненный интерес представляет сопоставление оценок качества изображений голографических оптических элементов по различным критериям.

С этой целью производился машинный расчет распределения качества по полю действительного изображения осевых голографических линз. Анализировались линзы с относительным отверстием 1 : 4, длиной волны записи и восстановления  $\lambda = 632.8$  нм и фокусным расстоянием  $F = 80$  мм. Расчеты производились на ЭВМ, при расчете методом геометрической оптики прослеживался ход ста лучей.



а — схема защиты и восстановления горячих линз, О, R, C — объект, опорный и восстанавливающий источники соответственно. Двойной стрелкой указано направление перемещения восстанавливающего источника при расчете распределения качества D, по предметному полю. б — кривые изменения качества изображения, 1 — график зависимости D, от предметному полю. 2 — M, 3 — Q<sub>1</sub>, 4 — Q<sub>2</sub>, 5 — Q<sub>3</sub>, 6 — Q<sub>4</sub>.

Рис. 1-4.





Схемы записи и восстановления анализированных голографических линз представлены на рис. 1, а—4, а. Изображение точечного источника  $C$ , создаваемое линзой рис. 1, а, не свободно только от сферической аберрации ( $d_0 = d_R \neq d_C$ , где  $d$  — расстояние от точечного источника до плоскости голограммы; индексы  $O, R, C$  — относятся к объектной, опорной и восстанавливающей волне соответственно). Линза, геометрия записи и восстановления которой показана на рис. 2, а, обладает неустранимыми по всей плоскости изображения астигматизмом и кривизной поля ( $d_0 = d_R = d_C$ ). На рис. 3, а показана схема записи и восстановления линзы с двухкратным увеличением ( $d_C = d_R, d_0 = 2d_R$ ) обладающей комой, астигматизмом и кривизной поля. Зонная пластинка Френеля (рис. 4, а;  $d_C = d_R = \infty$ ) также несвободна от астигматизма, комы и кривизны поля, однако величины аберрации и соотношения между ними иные, чем в предыдущем случае.

Кривые изменения качества изображения рассмотренных линз, оцениваемого по различным критериям в зависимости от величины отклонения восстановленного источника от объектного —  $\Delta$  и соответствующей этому отклонению величины волновой аберрации на краю апертуры —  $W$ , показаны на рис. 1, б—4, б, где  $D$  — кривые изменения интенсивности Штреля, вычисляемой в точке параксиального изображения, а  $M = \left(1 - \frac{2\pi^2}{\lambda^2} \overline{\Delta W_0^2}\right)^2$  — кривые изменения числа Марешаля;  $\overline{\Delta W_0^2}$  — среднеквадратичное отклонение волнового фронта от опорной сферы Гаусса.

Кривые изменения критериев  $Q_1$  и  $Q_2$  показывают, что для получения идеального изображения (волновая аберрация на краю апертуры  $W \leq 0.1\lambda$ ) радиус пятна рассеяния лучей не должен превышать одной десятой радиуса диска Эйри для любой из рассмотренных схем записи и восстановления. Критерии Штреля и Марешаля хорошо согласуются между собой, но их соотношения с условием Рэлея резко зависят от схемы записи и восстановления голографической линзы. Из анализа представленных кривых очевидно, что критерии  $Q_3$  и  $Q_4$  также хорошо согласуются между собой, но несколько более «жестки», чем условия Рэлея и, следовательно, при величинах  $Q_3$  и  $Q_4$  больших 0.8 в пределах предметного поля, высокое качество изображения может быть гарантировано, независимо от схемы записи голографической линзы.

В заключение отметим, что критерии вида  $Q_1 - Q_4$  могут быть использованы при решении задач оптимизации при создании сложных оптических компонентов, включающих как элементы классической оптики, так и голограммы.

Авторы выражают благодарность М. М. Бутусову, Б. Н. Котлецову за интерес к работе и полезные обсуждения, а также Е. И. Гринбергу за помощь в расчетах.

#### Литература

- [1] Lord Rayleigh. Phil. Mag., 5, 403, 1879.
- [2] А. Марешаль, М. Франсон. Структура оптического изображения. «Мир», М., 1964.
- [3] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. «Наука», М., 1970.
- [4] Т. Катаяма, К. Р. Мияке. Sci. Light, 12, 50, 1963.

Поступило в Редакцию 3 мая 1976 г.