

РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННЫЙ ОБЪЕКТИВ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.А. Зубов, И.А. Михайлов, Т.Т. Султанов

Рассмотрены характеристики объектива, состоящего из плосковыпуклой линзы и киноформного корректора. Анализ показал, что объектив обеспечивает дифракционное качество изображения. Потери света в нем связаны главным образом с отражением на двух поверхностях и заметно меньше, чем у подобных микроскопических объективов.

При работе с лазерными источниками света перспективной элементной базой являются киноформные дифракционные оптические элементы [1-3]. С увеличением числа уровней квантования фазы дифракционная эффективность (ДЭ) элемента быстро возрастает: при 2, 4, 6, 8 уровнях расчетная ДЭ равна соответственно 40, 81, 91, 95%. Такие элементы могут обладать фокусирующими свойствами, вносить в оптическую систему заданную величину "асферичности", свойства цилиндрической оптики, строить сложные изображения символов и т.д. Актуальной задачей является создание простых эффективных элементов для фокусировки лазерного излучения и, в частности, для ввода излучения в стекловолокно, позволяющих заменить объективы, сложная многолинзовая конструкция которых затрудняет получение высокого светопропускания. Для получения изображения хорошего качества для точки на оси системы в монохроматическом свете достаточно компенсации лишь сферической aberrации. Этому условию удовлетворяет исследованный в данной работе простой монохроматический рефракционно-дифракционный объектив (рис. 1) для фокусировки лазерного излучения.

Объектив состоит из плосковыпуклой линзы и киноформного дифракционного корректора (ДК) с нулевой или слабой оптической силой, исправляющего сферическую aberrацию линзы. ДК располагается в плоскости входного зрачка на расстоянии t от плоской поверхности линзы, равном $t = f - (f + d_l)/n$, где f , d_l и n соответственно фокусное расстояние, толщина и показатель преломления линзы. При таком расположении зрачка плоская и сферическая поверхности линзы являются соответственно апланатической и концентрической поверхностями, что обеспечивает дополнительно компенсацию комы и астигматизма [4].

Структура ДК содержит концентрические дифракционные кольца и описывается функцией фазового сдвига $\Phi(r)$, равной по величине и противоположной по знаку волновой сферической aberrации линзы $W(r)$

$$\Phi(r) = -W(r) = k\lambda = B_3 r_k^4/4 + B_5 r_k^6/6 + \dots, \quad (1)$$

где λ — рабочая длина волны света; B_3, B_5, \dots — коэффициенты сферической aberrации третьего, пятого и т.д. порядков; r_k — радиус k -го дифракционного кольца. Число значимых коэффициентов B_i определяется из условия, чтобы вклад последующих членов разложения (1) не превышал допустимой величины волновой сферической aberrации ($\lambda/4$ при дифракционном качестве изображения). В рассматриваемом случае это дает

$$\Phi(r) = k\lambda = \frac{n^2 r_k^4}{8(n-1)^2 f^3} + \frac{n^2(n^2 - n + 1) r_k^6}{16(n-1)^4 f^5} + \dots$$

Для укрупнения структуры ДК и облегчения ступенчатой реализации колец корректору можно придать небольшую оптическую силу. Покажем это на примере ДК диаметром $2r$, исправляющего сферическую aberrацию третьего порядка B_3 . Структура ДК с нулевой оптической силой описывается выражением $B_3 r_k^4/4 = k\lambda$ и содержит $N = B_3 r^4/4\lambda$ колец. Минимальное расстояние d между кольцами достигается на

краю апертуры ДК и равно $\lambda/V_3 r^3$. Структура ДК с оптической силой описывается выражением: $-r_k^2/2f_g + V_3 r_k^4/4 = k\lambda$, где f_g — фокусное расстояние ДК. Анализ показывает, что максимальное значение d достигается при $f_g = 4/3V_3 r^2$ и равно $4\lambda/V_3 r^3$. В этом случае ДК содержит $N = 5V_3 r^4/32\lambda$ колец. Следовательно, ДК с f_g , оптимизирующим структуру, позволяет в четыре раза увеличить максимальное расстояние между кольцами и одновременно в 1,6 раза уменьшить число колец.

С целью экспериментальной проверки были изготовлены и исследованы объективы для фокусировки излучения гелий-неонового лазера на длине волны 632,8 нм с параметрами $t = 0$, $f = 7,8$ мм, $n = 1,513$, $d_l = 4$ мм. Расчет показал, что при апертуре ДК $2r = 2$ мм вклад порядков сферической аберрации выше третьего не превышает $\lambda/4$. Поэтому в структуру ДК были внесены сферическая аберрация третьего порядка и оптимальная оптическая сила ($f_g = 145,2$ мм), не изменяющая аберрационных свойств объектива, но позволяющая укрупнить структуру колец, увеличить d с 69 до 276 мкм. ДК был изготовлен химическим травлением стекла в слабом растворе HF в виде 8-уровневого киноформа с помощью трех согласованных фотошаблонов, которые получались в увеличенном виде на координатографе, а затем репродуцировались с требуемой кратностью уменьшения. Травление структуры фотошаблона осуществлялось на глубину $\lambda/2^m (n - 1)$, где m — номер фотошаблона. В процессах фотолитографии использовался фоторезист ФПРН-7. Контроль глубины травления проводился на микроинтерферометре МИИ-4 и на профилографе. После изготовления корректор был склеен с линзой, так что толщина полученного рефракционно-дифракционного элемента составила 4 мм.

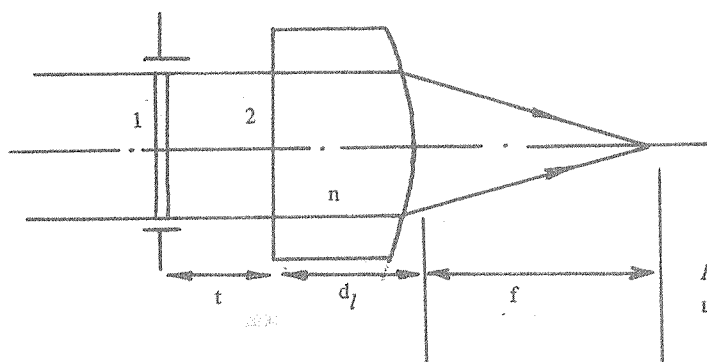


Рис. 1. Оптическая схема объектива: 1 — дифракционный корректор, 2 — линза.

Т а б л и ц а 1

Сравнение объективов

| Тип объектива | Пропускание объектива | | | Пропускание системы объектив-стекловолокно | |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|--|-------------------|
| | без диафрагмы | с диафрагмой 1,8 мм | с диафрагмой 1 мм | без диафрагмы | с диафрагмой 1 мм |
| Микрообъектив 40 ^X | — | 0,80 | 0,80 | 0,19 | 0,35 |
| Микрообъектив 20 ^X | 0,72 | 0,72 | 0,73 | 0,29 | 0,42 |
| Микрообъектив 8 ^X | 0,79 | 0,79 | 0,79 | 0,42 | 0,26 |
| Рефракционно-дифракционные объективы | — | 0,90 | 0,90 | — | 0,38 |
| | — | 0,91 | 0,91 | — | 0,40 |
| | — | 0,90 | 0,90 | — | 0,37 |

Для трех объективов описанного типа были измерены такие характеристики, как пропускание с диафрагмами 1,8 и 1 мм и пропускание системы объектив — стекловолокно с диафрагмой диаметром 1 мм. Одномодовое стекловолокно имело диаметр средней жилы ~ 5 мкм и длину ~ 1 м и было рассчитано на работу с излучением гелий-неонового лазера. Для сопоставления подобные измерения были выполнены для ряда

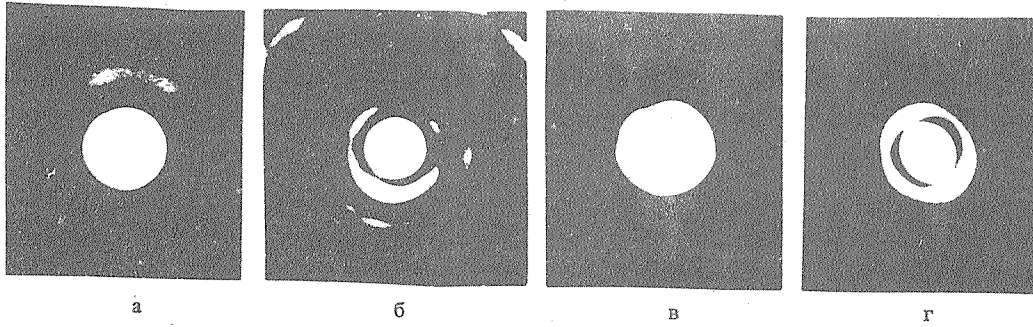


Рис. 2. Структура фокального пятна линзы без корректора (а), линзы с корректором (б), микрообъектива 20^{\times} (в) и микрообъектива 40^{\times} (г).

отечественных стандартных микрообъективов: 40^{\times} , 20^{\times} и 8^{\times} с тем, чтобы иметь объектив с угловой апертурой, близкой к апертуре рефракционно-дифракционного объектива (0,256 рад), достаточно хорошо согласованный по апертуре со стекловолокном ($\sim 16^{\times}$ для $D = 2$ мм и $\sim 30^{\times}$ для $D = 1$ мм). Экспериментальные результаты приведены в табл. 1, каждое значение получено в результате усреднения пяти или более измерений. На рис. 2 представлены изображения структуры дифракционного пятна для ряда объективов. Экспериментальные результаты показывают, что рефракционно-дифракционные объективы обеспечивают дифракционное качество изображения и обладают потерями, связанными в основном с отражением на двух внешних поверхностях, в хорошем соответствии с тем, что ожидалось. По этому параметру они превосходят обычные микрообъективы. При работе со стекловолокном также имеет место согласие с ожидаемыми результатами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голуб М. А. и др. Письма в ЖТФ, 8, вып. 8, 449 (1982).
2. Солдатенков И. С., Соскин С. И. В кн. Сборник трудов 4-ой Всесоюзной конференции по голографии. Ереван, 1982, т. 2, с. 29.
3. Mikhaltsova I. A., Nalivaiko V. I., Soldatenkov I. S. Kinoform axicons. Optik, 67, № 3, 267 (1984).
4. Русин М. М. Техническая оптика. М.-Л., Машгиз, 1961, с. 328.

Поступила в редакцию 14 апреля 1987 г.