

ЭЛЕМЕНТЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

И.А. Михайлов

КИНОФОРМНЫЕ КОРРЕКТОРЫ СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ХИМИЧЕСКИМ ТРАВЛЕНИЕМ СТЕКЛА

При работе с лазерными источниками света перспективной элементной базой являются киноформные дифракционные оптические элементы с многоуровневым ступенчатым, приближающимся к треугольному профилю штрихов. С увеличением числа уровней квантования фазы дифракционная эффективность (ДЭ) киноформа быстро возрастает: при 2,3,4,5,6,8 уровнях расчетная ДЭ равна соответственно 40,68, 81,87,91,95%. Такие элементы могут обладать фокусирующими свойствами, вносить в оптическую систему заданную величину "асферичности", свойства цилиндрической оптики, выполнять сложные преобразования волновых фронтов [1,2]. Перспективной областью применения киноформов является коррекция сферической aberrации оптических элементов и систем и создание на этой основе простых по конструкции высококачественных рефракционно-дифракционных оптических систем.

Для изготовления киноформных элементов применяются различные методы, такие, как ионное травление стекла [3], химическое травление окиси кремния [4] и плавного кварца [5]. Ионное травление стекла позволяет получать качественные элементы, однако при этом необходимо специализированное оборудование для ионной обработки поверхности с высокой степенью равномерности. Хорошие результаты получены при изготовлении киноформов химическим травлением плавного кварца [6,7], однако более перспективным представляется химическое травление стекла, являющегося более дешевым и

доступным материалом. В работе приведены результаты изготовления осесимметричных киноформных дифракционных корректоров (К) сферической aberrации (СА) химическим травлением стекла и параметры созданных на этой основе рефракционно-дифракционных объективов, предназначенных для работы с лазерным излучением в видимом диапазоне.

Процесс изготовления К состоит из следующих стадий:

- определение плоскости коррекции и расчет волновой СА оптической системы в этой плоскости;
- расчет и изготовление комплекта согласованных фотошаблонов структуры К;
- изготовление К методом фотолитографии и химического травления стекла.

Ввиду того, что К по своим функциям аналогичен коррекционной пластинке Шмидта, оптимальной является его установка в зрачке, а точнее в плоскости действующей диафрагмы корректируемой системы [8]. В этом случае К не вносит полевых aberrаций.

Структура осесимметричного К с нулевой оптической силой содержит концентрические дифракционные кольца и описывается функцией фазового сдвига $\Phi(r)$, равной по величине и противоположной по знаку волновой СА корректируемой системы $W(r)$:

$$\Phi(r) = -W(r) = k\lambda = \frac{1}{4} B_3 r^4 + \frac{1}{6} B_5 r^6 + \frac{1}{8} B_7 r^8 + \dots, \quad (1)$$

где λ - рабочая длина волны света, k - число длин волн, соответствующее волновой СА, r - текущий радиус в плоскости К, $B_3, B_5, B_7, \dots$ - коэффициенты СА третьего, пятого, седьмого и т.д. порядков. Границам дифракционных колец (зон Френеля) соответствуют целые значения k .

Возможность многоступенчатой реализации К в виде киноформа зависит от величины производной $\Phi'(r)$, которая соответствует поперечной СА системы:

$$\Phi'(r) = \frac{\lambda}{d} = \sin \varphi' - \sin \varphi = B_3 r^3 + B_5 r^5 + B_7 r^7 + \dots, \quad (2)$$

где d - расстояние между соседними кольцами (ширина френелевской зоны), φ и φ' - углы падающего и отклоненного корректором лучей, соответствующих осевой точке предмета, с осью системы. С помощью формулы (2) можно определить наименьшую ширину френелевской зоны d и, соответственно, возможность ее разбиения на ступеньки при изготовлении киноформа.

Для определения коэффициентов B_i используется метод расчета хода лучей [9], исходящих из осевых точек предмета и изображения при различных апертурных углах. Число значимых коэффициентов B_i определяется из условия, что вклад последующих членов разложения (1) не превышает допустимую величину волновой СА, например $0,25\lambda$ или $0,1\lambda$ согласно критериям Рэлея для хорошего и идеального изображения [10].

В общем случае К может обладать оптической силой, при этом разложение $\Phi(r)$ имеет вид:

$$\Phi(r) = k\lambda = -\frac{r^2}{2f} + \frac{1}{4} B_3 r^4 + \frac{1}{6} B_5 r^6 + \frac{1}{8} B_7 r^8 + \dots, \quad (3)$$

где f - фокусное расстояние К. В работе [6] в структуру К была введена слабая оптическая сила для компенсации хроматизма. При использовании в монохроматическом свете К можно придать небольшую оптическую силу для укрупнения его структуры и облегчения реализации в виде киноформа. Поскольку важнейшими параметрами К являются минимальная ширина френелевской зоны d и число зон N , оптическую силу можно использовать для получения максимального значения d (укрупнения структуры) либо минимального значения N (уменьшения трудоемкости изготовления фотошаблонов). Исследования показали [11], что более предпочтительным является первый вариант. Например, в случае К с апертурой $2r_0$, исправляющего заданную СА третьего порядка с коэффициентом B_3 , введение оптимальной оптической силы $f^{-1} = 0,75 B_3 r_0^2$, соответствующей максимуму d , позволяет в 4 раза увеличить d и одновременно в 1,6 раза уменьшить N по сравнению с аналогичным К, обладающим нулевой оптической силой. На рис. 1 показаны фотошаблоны К с нулевой и оптимальной оптической силой, соответствующей максимуму d .

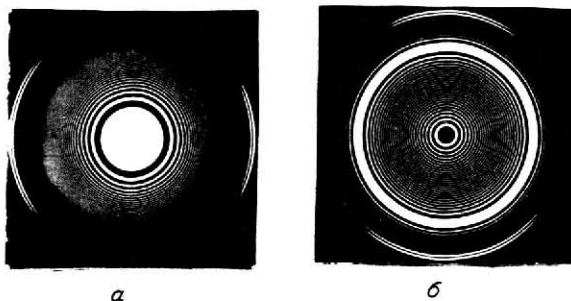


Рис. 1. Фотошаблоны корректоров с нулевой (а) и оптимальной (б) оптической силой, соответствующей максимуму d

При m -уровневой ступенчатой реализации профиля френелевских зон К топология колец описывается формулой:

$$\Phi(r) = (k + \frac{i}{m})\lambda, \quad i = 0, 1, 2, \dots, m-1, \quad (4)$$

где k принимает целые значения и соответствует границам френелевских зон, а i - границам колец (ступенек) внутри зон.

Для изготовления К использовали последовательный и двоичный методы получения ступенчатой структуры киноформа. В последовательном методе для получения m -уровневой структуры используется $m-1$ фотошаблонов, каждый из которых содержит одинаковое число колец, равное числу зон N . Травление в каждом процессе фотолитографии осуществляется на глуби-

ну ступеньки, равную $\frac{\lambda}{m(n-1)}$, где n - показатель преломления стекла.

Двоичный метод позволяет с помощью l фотошаблонов получать ступенчатую

структуру с 2^l уровнями и таким образом существенно уменьшить число фотошаблонов и процессов фотолитографии. Число колец в фотошаблоне равно $N \cdot 2^{l-1}$, травление структуры фотошаблона осуществляется на глубину $\frac{\lambda}{2^l(n-1)}$, где l -

номер фотошаблона. На рис. 2 показаны процессы изготовления с помощью трех фотошаблонов 4-уровневого элемента последовательным методом и 8-уровневого элемента двоичным методом.

Структуры фотошаблонов получали в увеличенном масштабе на координатографе, а затем редуцировали с требуемой кратностью уменьшения. В процессах фотолитографии использовали позитивный фоторезист ФРН-7. Проявление и удаление фоторезиста осуществляли в стандартных щелочных растворах КОН. Для травления стекла использовали растворы плавиковой кислоты, глубину травления контролировали на микроинтерферометре МИИ-4 и на профилографе. На рис. 3 показана усредненная по многим измерениям экспериментальная зависимость глубины h от времени t травления стекла в трех растворах HF различной концентрации, перекрыва-

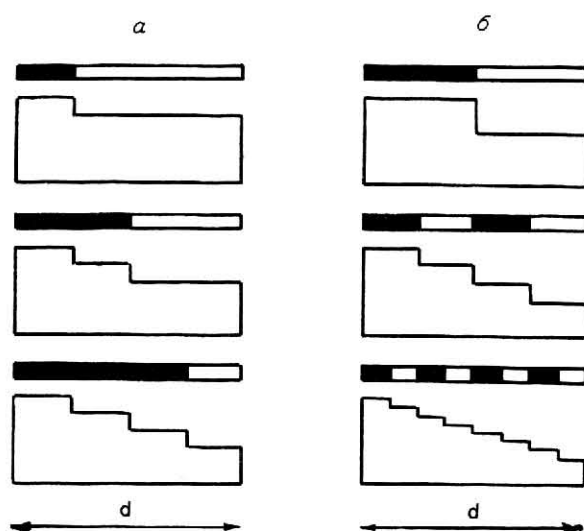


Рис. 2. Процессы изготовления с помощью трех фотошаблонов 4-уровневого элемента последовательным методом (а) и 8-уровневого элемента двоичным методом (б)

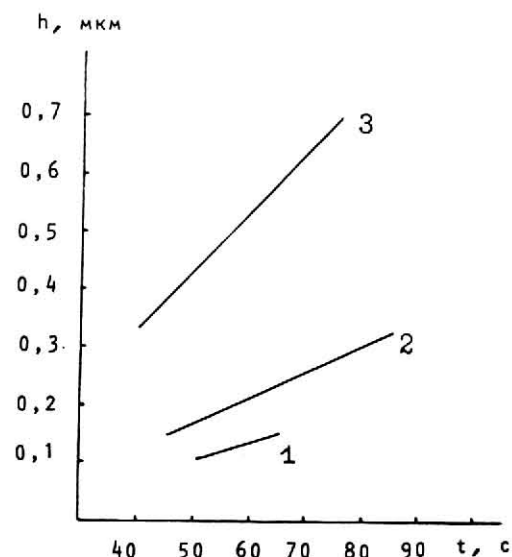


Рис. 3. Экспериментальная зависимость глубины (h) от времени (t) травления стекла в трех растворах HF различной концентрации: 1, 2, 3 - соответственно 40, 80, 100 мл HF на 1 л H_2O

ющих диапазон глубин травления до 0,7 мкм.

Описанные методы расчета и изготовления К были использованы при создании монохроматических проекционных рефракционно-дифракционных объективов для телевизионного лазерного проектора на основе квантоскопов - полупроводниковых лазеров с накачкой электронным пучком, мощность излучения которых позволяет получать в телевизионном режиме изображение на большом экране площадью 12 кв. м [12]. Объектив состоит из двух плосковы-

пуклых линз и К СА (рис. 4). Были изготовлены объективы с фокусным расстоянием $f' = 140, 120, 82$ мм. Параметры объективов и входящих в них К приведены в таблице.

Объективы с фокусным расстоянием 140 и 120 мм имеют относительное отверстие соответственно 1:3,5 и 1:3 и содержат 6-уровневые К с нулевой оптической силой и рабочей апертурой 40 мм, изготовленные последовательным методом с помощью комплектов из пяти фотошаблонов. Расчет методом хода лучей показал, что

Параметры объективов для проекции изображения	Фокусное расстояние, мм		
	140	120	82
Рабочий фокальный отрезок, мм	135	115	75
Диаметр полезного поля, мм	40	40	40
Разрешение, линий/мм:			
в центре поля	80	80	80
на краю	40	40	40
Световой диаметр линз, мм	60	70	80
Светопропускание рефракционной части, %	80	80	95
Относительное отверстие, мм	1:3,5	1:3	1:2,4
Параметры корректоров			
Рабочая апертура, мм	40	40	35
Количество уровней, м	6	6	8
ДЭ, %	84	84	83
Число колец, N	20	31	33
Минимальная ширина Френелевской зоны (d), мкм	260	164	341
Фокусное расстояние, мм	∞	∞	3330

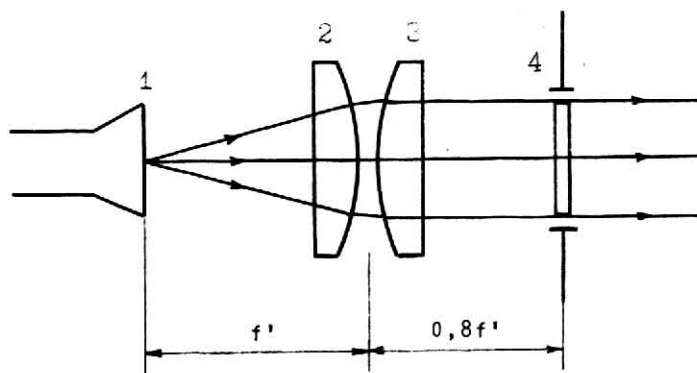


Рис. 4. Оптическая схема объектива для проекции изображения на большой экран: 1 - квантоскоп; 2 и 3 - линзы; 4 - корректор

при работе на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм в красной области спектра вклад СА выше пятого порядка не превышает $0,25\lambda$, поэтому в структуру К были введены соответствующие величины СА третьего и пятого порядков. В объективах с $f' = 140$,

120 мм число колец N и минимальная ширина Френелевской зоны d в структуре К имеют значения соответственно $N = 20$, 31 и $d = 260$, 164 мкм, при этом минимальный размер ступеньки достигается на краю апертуры К и составляет соответственно 43 и 27 мкм. Экспериментально получена ДЭ К, равная 84%.

Двоичный метод использован при создании более короткофокусного и светосильного объектива с $f' = 82$ мм и рабочей апертурой К 35 мм (относительное отверстие объектива 1:2,4). С помощью двух фотошаблонов (первый показан на рис. 1,а) изготовлены 4-уровневые К с нулевой оптической силой и параметрами $N = 52$, $d = 83$ мкм при минимальной ширине ступеньки на краю апертуры К около 20 мкм. В структуру К также введены соответствующие величины СА третьего и пятого порядков. Экспериментально получена ДЭ 72%. Отметим, что реализация такой структуры К в виде 8-уровневого киноформы является достаточно сложной задачей, так как при этом минимальная ширина ступеньки составляет около 9 мкм,

что предъявляет более жесткие требования к оборудованию для изготовления К. Поэтому при получении 8-уровневых К был использован описанный выше прием

укрупнения структуры К путем введения небольшой оптической силы ($f = 3330$ мм), соответствующей максимуму d. Это позволило увеличить d с 83 до 341 мкм и соответственно минимальную ширину ступеньки с 9 до 35 мкм и одновременно уменьшить число колец N с 52 до 33. Первый фотошаблон, использованный при изготовлении 8-уровневого К, показан на рис. 1,б. Экспериментально получена ДЭ К, равная 83%.

Наряду с объективами для красной области спектра изготовлены аналогичные объективы с $f' = 140$, 120, 82 мм для квантоскопов, излучающих в зеленой и синей областях спектра. Это позволило осуществить проекцию цветного изображения, формируемого тремя квантоскопами, на большой экран с диагональю 3 м при разрешении 1200 тел. строк.

Описанные методы расчета и изготовления К были использованы также при создании рефракционно-дифракционных объективов для ввода излучения гелий-неонового лазера ($\lambda = 0,633$ мкм) в стекловолокно [13]. Объектив состоит из плосковыпуклой линзы (рис. 5) и склеенного с ней 8-уровневого К, изготовлен-

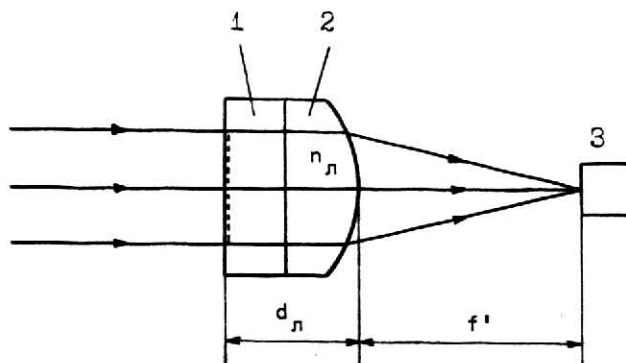


Рис. 5. Оптическая схема объектива для ввода лазерного излучения в стекловолокно: 1 - корректор; 2 - линза; 3 - стекловолокно

ного двоичным методом. Параметры объективов: фокусное расстояние $f' = 7,8$ мм, толщина объектива $d = 4$ мм, показатель преломления линзы $n_L = 1,513$ (стекло К-14). Расчет показал, что при рабочей апертуре К, равной 2 мм, вклад порядков СА выше третьего не превышает $0,25\lambda$. Поэтому в структуру К была введена СА третьего порядка и оптимальная оптическая сила, соответствующая максимуму d (фокусное расстояние $f = 145,2$ мм), позволявшая увеличить d с 69 до 276 мкм. Проведенные исследования показали, что

объективы обеспечивают дифракционное качество фокусировки и обладают, в основном, потерями, связанными с френелевским отражением на двух внешних поверхностях.

Полученные результаты показывают, что киноформные дифракционные корректоры могут эффективно использоваться для исправления сферической аберрации при работе с лазерными источниками света. На основе таких элементов возможно создание простых высококачественных оптических систем.

Л и т е р а т у р а

1. Голуб М.А., Дегтярева В.П., Климов А.Н., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян Е.В., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. Машинный синтез фокусирующих элементов для CO_2 лазера // Письма в ЖТФ, 1982, вып. 8, т. 8, с. 449-451.
2. Гончарский А.В., Данилов В.А., Попов В.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Степанов В.В. Фокусаторы лазерного излучения, падающего под углом // Квантовая электроника, 1984, т. 11, № 1, с. 166-168.
3. Бобров С.Т., Котлецов Б.Н., Минаков В.И., Туркевич Ю.Г. Изготовление голографических оптических элементов методами фотолитографии и ионного травления // Оптическая голография и ее применение в промышленности. Л.: ЛДНТП, 1976, с. 31-32.
4. D'Auria L., Huignard J.P., Roy A.M., Spitz E. Photolithographic fabrication of thin film lenses // Optics communications, 1972, vol. 5, N 4, p. 232-235.
5. Левин В.Я., Пен Е.Ф., Солдатенков И.С., Солдатенкова В.В., Соскин С.И. Изготовление и исследование фазовых масок для устройств хранения и обработки информации // Оптико-механическая промышленность, 1978, № 3, с. 43-47.
6. Солдатенков И.С., Соскин С.И. Однокомпонентный объектив с линейным многоуровневым корректором аберраций // Сборник трудов четвертой всесоюзной конференции по голографии. Ереван: ВНИИРИ, 1982, т. 2, с. 29-31.
7. Mikhaltsova I.A., Nalivaiko V.I., Soldatenkov I.S. Kinoform axicons. Optik, 1984, B. 67, N. 3, S. 267-278.
8. Русиков М.М. Техническая оптика. М.-Л.: Машгиз, 1961. - 328 с.
9. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. - 671 с.
10. Туркинг И.А. Прикладная оптика. М.: Машиностроение, 1966. - 432 с.
11. Михайлов И.А., Савидова В.М. Киноформные корректоры сферической аберрации // Оптико-механическая промышленность, 1988, № 1, с. 23-26.
12. Григорьев В.И., Кацап В.К., Куклев В.П., Ситников В.Е., Улахов В.Н. О возможности применения квантоскопов - новых электронно-лучевых приборов на основе сканирующих полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением для создания цветных проекционных телевизионных устройств с большим экраном. Квантовая электроника, 1980, т. 7, № 3, с. 489-494.
13. Зубов В.А., Михайлов И.А., Султанов Т.Т. Рефракционно-дифракционный объектив для фокусировки лазерного излучения // Краткие сообщения по физике. М.: ФИАН СССР, 1987, № 8, с. 8-10.