

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 6

1998

УДК 621.315.592.722.99

Г. А. Ленкова, А. М. Щербаченко
(Новосибирск)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ
СТУПЕНЧАТЫХ КИНОФОРМНЫХ ЛИНЗ

Рассматривается способ оптимизации профиля ступенчатой киноформной линзы, изготавливаемой с помощью двух фотошаблонов. Способ основан на формировании фазового профиля линзы с комбинированной структурой зон.

Киноформная линза – это плоский оптический элемент, обладающий фокусирующими свойствами за счет дифракции света на его структуре. Технология изготовления киноформных линз сводится к формированию на плоской подложке концентрических кольцевых зон с фазовым профилем, оптическая глубина которого не превышает длины световой волны. Под оптической глубиной понимается фазовая задержка, которая вносится в падающий волновой фронт путем изменения толщины материала или показателя преломления.

Среди множества технологий формирования фазового профиля киноформных линз [1] наиболее распространенной является технология, основанная на методах фотолитографии. Для получения идеального (пилообразного) или близкого к нему профиля со ступенчатой структурой используется полутоновый фотошаблон или комплект бинарных фотошаблонов. После экспонирования полутонового фотошаблона на фоторезист и последующего проявления в слое фоторезиста образуется рельеф, соответствующий пропусканию фотошаблона. Далее методом ионного травления рельеф переносится в материал подложки и формируется заданный профиль киноформной линзы. При производстве ступенчатых киноформных линз топология зон каждого из бинарных фотошаблонов последовательно переводится в материал подложек в виде ступенек, ширина и глубина которых изменяются в зависимости от фотошаблона.

Одной из основных характеристик киноформных линз является дифракционная эффективность, которая представляет собой отношение потока световой энергии, собираемой оптическим элементом в главном фокусе (в первом порядке), ко всему потоку, прошедшему через элемент. Другой важнейшей характеристикой киноформной линзы является диаметр светового пятна в фокусе. Известно, что чем больше отношение диаметра линзы к ее фокусному расстоянию, тем меньше диаметр пятна в фокусе и выше разрешающая способность линзы.

Дифракционная эффективность ступенчатых киноформных линз увеличивается с увеличением числа ступеней, аппроксимирующих пилообразный профиль. В [2] рассматривается способ формирования ступенчатой структуры линз с числом уровней квантования больше чем два, позволяющий оптимизировать количество фотошаблонов при заданной дифракционной эффективности и апертуре линзы. Аппроксимация производится ступенчатыми функциями с амплитудами кратными 2. При этом число ступенек в каждой дифракционной зоне одинаково по всей апертуре. Чаще всего применяется четырехступенчатая (эффективность 81 %), реже восьмиступенчатая (95 %) структура.

Увеличение количества ступеней ограничивается допустимым размером ступеньки в крайних зонах линзы, ширина которых уменьшается при удалении от центра линзы. Эта же причина влияет на размер пятна в фокусе линзы. Современное фотолитографическое оборудование, включающее запись фотошаблонов лазерным или электронным лучом, позволяет формировать дифракционные структуры с элементарным размером порядка длины световой волны λ , и поэтому его разрешающая способность не является в настоящее время главным ограничивающим фактором. Ограничение скорее связано с областью применения скалярной теории дифракции. В [3] показано, что ошибки скалярной теории составляют не более 5 %, если наименьшая ширина ступени равна 2λ . При малом размере ступеней возникает также зависимость дифракционной эффективности от направления вектора поляризации.

Общепринятой в настоящее время является такая технология изготовления, при которой число ступенек в каждой киноформной зоне одинаково по всей апертуре оптического элемента. В работе предлагается способ оптимизации структуры, дающий возможность повысить дифракционную эффективность и разрешающую способность киноформных линз. Предлагаемый способ основан на формировании фазового профиля зон с комбинированной структурой. В [4] анализируются свойства плоской линзы с подобной структурой. В центральной части дифракционные зоны имеют пилообразный, а начиная с некоторого радиуса, когда размер зон становится сравнимым с предельным разрешением фотолитографического процесса, двухступенчатый (бинарный) профиль. В результате общая дифракционная эффективность при данной апертуре линзы увеличивается с 38 до 62 %.

В рассматриваемом случае вся площадь киноформной линзы разбивается на ряд кольцевых областей. В центральной части формируется фазовый профиль с максимальным числом ступеней при заданном числе фотошаблонов. Для двух фотошаблонов оно равно 4. Переход к следующей области в направлении от центра осуществляется, когда ширина ступени в предыдущей области становилась равной предельно допустимой d . Причем число ступеней после перехода уменьшалось на одну ступеньку. Таким образом, ширина последней зоны в каждой области равна md (m – число ступеней), а на краю линзы – $2d$.

Радиусы зон r_n и ширина n -й зоны dr_n киноформной линзы, как известно, определяются выражениями:

$$r_n = (2fn\lambda + n^2\lambda^2)^{1/2}, \quad (1)$$

$$dr_n = (f\lambda + n\lambda^2)/r_n, \quad (2)$$

где f – фокусное расстояние киноформной линзы; λ – конструктивная длина волны.

На основании (2), полагая $dr_n = md$, можно определить радиусы кольцевых областей r_m , начиная с которых число ступенек в зоне уменьшается на одну:

$$r_m = (f\lambda + n\lambda^2) / md. \quad (3)$$

Приравнивая правые части (1) и (3), находим, что номер зоны на границе кольцевой области в первом приближении равен

$$n = f / 2m^2 d^2. \quad (4)$$

Принимая во внимание, что последняя зона линзы имеет размер $2d$, можно найти отношение радиуса каждой области r_m к полному радиусу линзы:

$$r_m / r = 2(f + n\lambda) / m(f + k\lambda), \quad (5)$$

где n, k – число зон на внешней границе кольцевой зоны и всей апертуре линзы соответственно. При $n\lambda \ll f$ и $k\lambda \ll f$ уравнение (4) последовательно преобразуется в выражения:

$$r_m / r = 2f / m(f + k\lambda), \quad (6)$$

$$r_m / r = 2 / m. \quad (7)$$

При двух фотошаблонах относительные радиусы последовательных кольцевых областей на основании (7) равны 0,5 ($m=4$); 0,67 ($m=3$) и 1 ($m=2$). Отсюда можно определить относительную площадь каждой кольцевой области в направлении от центра: 0,25, 0,194 и 0,556, полагая, что площадь всей линзы равна 1. На рис. 1 представлена в масштабе (в соответствии с (7)) схема

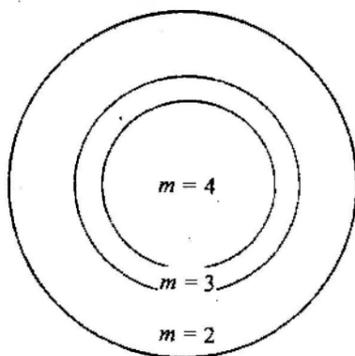


Рис. 1

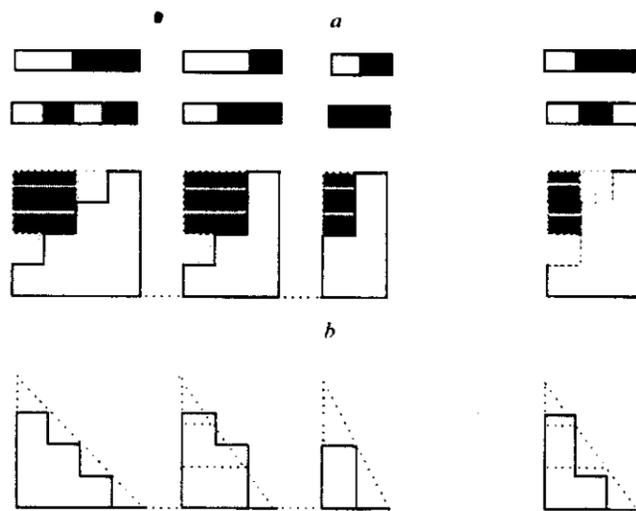


Рис. 2

расположения кольцевых зон с числом ступенек фазового профиля линзы $m = 4, 3, 2$.

На рис. 2, *a* схематически показана последовательность травления матрицы через два фотошаблона, а на рис. 2, *b* – форма профиля отпечатка с матрицы на внешних границах кольцевых областей. Пунктиром обозначена форма профиля для равномерной аппроксимации трехступенчатого профиля, если бы высота каждой ступеньки увеличивалась на $1/3$ высоты пилообразного профиля. На рис. 2, *a, b* справа показан второй возможный вариант трехступенчатой структуры. Ошибка в фазовой задержке для трехступенчатой структуры составляет в первом варианте: на первой ступени $+30^\circ$ ($\pi/6$), на второй -60° ($\pi/3$); во втором варианте: $+30^\circ$ ($\pi/6$) и -30° ($\pi/6$) соответственно. Расчетная дифракционная эффективность для обоих вариантов одинакова.

Границы зон на первом и втором фотошаблонах определяем на основании (1), подставляя, кроме целых, дробные значения n , указанные в табл. 1. Переход к областям с меньшим числом ступеней квантования осуществляется при $r_n = r_m$ (см. (5)) и $n = b/m^2$, где $b = f/2a^2$ (см. (4)).

Таблица 1

Число ступеней, m	Пределы номеров зон, n	Границы зон	
		Первый фотошаблон	Второй фотошаблон
4	$0 < n \leq b/16$	$n + 0,5$	$n + 0,25; n + 0,5; n + 0,75$
3	$b/16 < n \leq b/9$	$n + (2/3)$	$n + (1/3)$
2	$b/9 < n \leq b/4$	$n + 0,5$	–

Таблица 2

Число шагов квантования фазы, m	Площадь кольцевых областей, %	Дифракционная эффективность, %	Приведенная дифракционная эффективность, %
4	25	81,1	20,3
3	19,4	56,7	11,1
2	55,6	40,5	22,5

Дифракционная эффективность каждого участка рассчитывалась по следующей формуле для ступенчатых структур, приведенной в [5]:

$$I = PW, \quad (8)$$

где $P = \frac{\sin^2[(2\pi n - \varphi_{\max})/2]}{m^2 \sin^2[(2\pi n - \varphi_{\max})/2m]}$; $W = \frac{\sin^2(\pi n/m)}{(\pi n/m)^2}$; n – номер порядка дифракции; m – число ступеней; φ_{\max} – максимальная фазовая задержка пилообразного профиля. Если $\varphi_{\max} = 2\pi$, то интенсивность в первом порядке (дифракционная эффективность) при равномерном квантовании будет определяться только значением W , так как $P = 1$. В первом порядке ($n = 1$) она составляет 40,5; 68,4; 81,1 % соответственно для $m = 2, 3, 4$.

Формула (8) верна для равномерного квантования. При неравномерном квантовании P будет меньше единицы. Следуя порядку вывода формулы (8) в [5], можно получить следующее аналитическое выражение, одинаковое для двух вариантов трехступенчатой структуры (см. рис. 2):

$$P = (1/9)[3 + 4\cos(\pi/6) + 2\cos(\pi/3)]. \quad (9)$$

На основании (9) $P = 0,8293$, и дифракционная эффективность $I = PW$ уменьшается с 68,4 до 56,7 %.

В табл. 2 представлены расчетные значения относительных площадей кольцевых областей и их дифракционной эффективности в зависимости от числа ступенек m . Приводятся также значения распределенной дифракционной эффективности, полученные в результате умножения эффективности на относительную площадь. Сумма этих значений дает общую дифракционную эффективность, которая составляет 53,9 %. Если не вводить трехступенчатую область, а заменить ее сразу двухступенчатой, то общая эффективность несколько снизится и составит 50,7 %.

Рассмотрим, насколько увеличивается относительное отверстие линзы за счет расширения апертуры зонами с трех- и двухступенчатой структурой. При $n\lambda \ll f$ из (3) следует, что

$$D/f = 2\lambda/md, \quad (10)$$

где $D = 2r_m$. Полагая $d = 2\lambda$, получим

$$D/f = 1/m. \quad (11)$$

Из (11) следует, что при допустимом размере ступеньки, равном 2λ , относительные отверстия составляют $1/4$ ($m=4$), $1/3$ ($m=3$) и $1/2$ ($m=2$), т. е. увеличиваются в 1,5 и в 2 раза при добавлении зон с $m=3$ и $m=2$ соответственно.

Проанализируем преимущества новой линзы. В отличие от структуры с равномерным квантованием ($m=2$) ее дифракционная эффективность при той же апертуре возрастает с 40,5 до 53,9 %, т. е. на 13,4 %. Если сравнивать комбинированную линзу с ее центральной зоной (где $m=4$), то ее дифракционная эффективность будет снижена с 81,1 до 53,9 %, однако при этом увеличивается в два раза ее относительное отверстие.

Можно получить еще больший, чем 13,4 %, выигрыш в эффективности, если проводить аналогичную оптимизацию фазового профиля дифракционных линз с помощью трех фотошаблонов, формируя в средней части линзы структуры с числом ступеней больше четырех (от пяти до восьми). Однако применение трех фотошаблонов существенно усложняет расчет топологии зон, а также приводит к снижению точности изготовления структуры из-за увеличения числа ступеней технологического процесса. Вполне возможно, что теоретическое увеличение эффективности в этом случае не будет реализовано из-за погрешностей изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технологии изготовления, практическое применение // Автометрия. 1985. № 1. С. 4.
2. Спектор Б. И. Об одном методе синтеза фазовой структуры киноформов // Автометрия. 1985. № 6. С. 34.
3. Pommet D. A., Moharam M. G., Grann E. B. Limits of scalar diffraction theory for diffractive phase elements // JOSA. 1994. 11, N 6. P. 1827.
4. Pitt C. W., Skinner J. D., Trotter G. R. Computer simulation of thin lenses // Opt. Commun. 1985. 53, N 2. P. 87.
5. Ленкова Г. А. Влияние глубины фазового профиля на распределение интенсивности в порядках дифракции бифокального элемента // Автометрия. 1995. № 5. С. 16.

Поступила в редакцию 13 апреля 1998 г.