

ЭЛЕМЕНТЫ ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ

УДК 535.42 : 612.844

Г. А. Ленкова

*(Новосибирск)*ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ФАЗОВОГО ПРОФИЛЯ
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ
В ПОРЯДКАХ ДИФРАКЦИИ БИФОКАЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Проведены аналитические исследования параметров дифракционных структур, направляющих падающий свет преимущественно в два (0-й и +1-й) дифракционных порядка равной интенсивности. Показано, что глубина пилообразного профиля, на основе которого формируется ступенчатая структура бифокального элемента, больше глубины просто пилообразного профиля и зависит от числа ступеней. Рассмотрена возможность корректировки глубины травления структуры в процессе ее изготовления. Проведена оценка влияния точности технологии изготовления на распределение интенсивности в порядках дифракции.

Введение. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ), как известно, разлагают свет в серию порядков или фокусов. В зависимости от назначения ДОЭ параметры дифракционной структуры (границы зон, форма и глубина профиля) рассчитываются таким образом, чтобы свет направлялся преимущественно в один порядок (однофокусные элементы) или распределялся по порядкам в соответствии с требованиями (многофокусные элементы).

Цель нашей работы состояла в анализе, исследовании, выборе и корректировке параметров фазового профиля дифракционной структуры, предназначенной для формирования двух дифракционных порядков равной интенсивности. Работа проводилась в связи с созданием бифокальных гибридных (дифракционно-рефракционных) искусственных хрусталиков глаза, известных также под названием интраокулярные линзы. В отличие от чисто рефракционного аналога гибридный хрусталик может обеспечить дальнее и ближнее зрение без разделения хрусталика на зоны с большей и меньшей рефракцией. Это осуществляется благодаря применению дифракционного компонента, создающего из падающего пучка света два, один из которых проходит без отклонения, а другой — фокусируется. Рефракционный компонент в сочетании с дифракционным образует двухфокусную линзу, которая формирует изображение удаленных предметов в первом пучке и ближних — во втором, причем в том и другом случае используется полная апертура линзы.

Известны работы по конструированию и созданию дифракционных двухфокусных [1] и многофокусных [2] интраокулярных линз, но в них не рассматриваются вопросы влияния параметров фазового профиля на распределение интенсивности в порядках дифракции.

Наш анализ дифракционных структур сделан в общем виде, и его результаты могут использоваться не только при разработке искусственных хрустали-

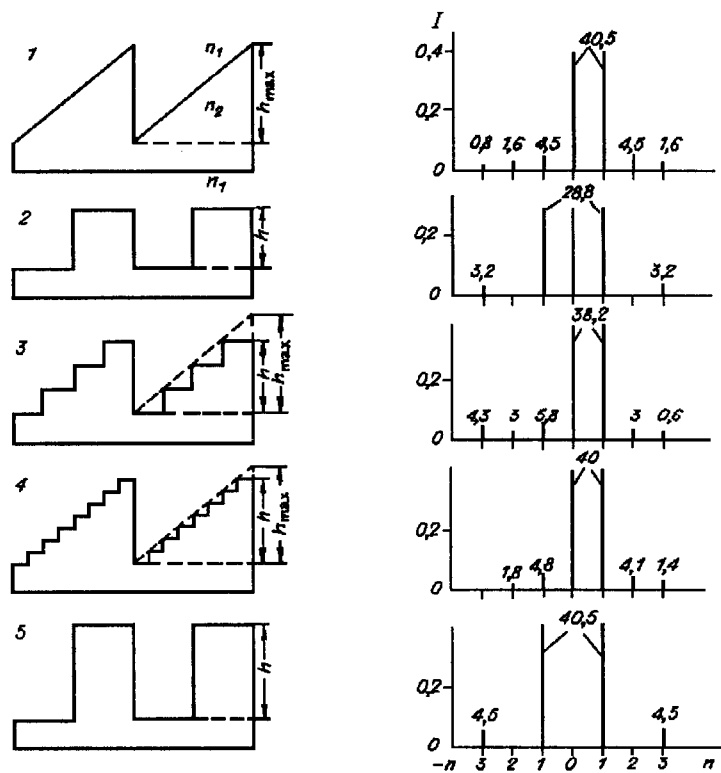


Рис. 1. Геометрические профили и дифракционные спектры фазовых структур:
число ступенек $M = 0$ (1); 2 (2); 4 (3); 8 (4); 2 (5); n — номер порядка дифракции; $\frac{h(n_2 - n_1)}{\lambda} = \frac{h_{\max}(n_2 - n_1)}{\lambda} = 0,5$ (1);

$$\frac{h(n_2 - n_1)}{\lambda} = \frac{M - 1}{Mk} = 0,32$$
 (2); 0,40 (3); 0,44 (4); 0,5 (5); $\frac{h_{\max}(n_2 - n_1)}{\lambda} = \frac{1}{k} = 0,64$ (2); 0,53 (3); 0,51 (4); 0,5 (5)

ков, но и в других областях. Конкретные расчеты параметров структуры иллюстрируются на примере дифракционного компонента для хрусталика.

Распределение интенсивности в порядках дифракции. Технология изготовления дифракционных элементов включает два этапа [3]. На первом этапе изготавливаются фотомаски, на втором — с их помощью методом фотолитографии формируется фазовый профиль. В дальнейшем предполагается, что границы зон выполнены точно, а форма профиля не искажается при травлении. Это допущение можно считать правомерным, если минимальный размер зон в несколько раз превышает погрешность изготовления фотомасок и границ фазовой структуры. Распределение интенсивности в этом случае будет определяться только формой и глубиной фазового профиля.

На рис. 1 представлено несколько наиболее распространенных форм профиля. Как будет показано ниже, для получения двух порядков дифракции равной интенсивности так же, как и для направления излучения преимущественно в один порядок (однофокусный дифракционный элемент), наиболее оптимальной формой фазового профиля является пилообразная (см. 1 на рис. 1). Однако изготовление такой формы профиля технически сложно, поэтому чаще профиль выполняется в виде ступенек (см. 2—5 на рис. 1).

Рассмотрим влияние параметров фазового профиля на дифракционный энергетический спектр. Для этого запишем аналитические выражения нормированных распределений интенсивности света в n -м и 0-м порядках дифракции для пилообразных (см. (1) и (2)) и ступенчатых (см. (3) и (4)) структур в зависимости от максимальной фазовой задержки φ_{\max} пилообразного профиля,

который в случае ступенчатых структур (см., например, 3 и 4 на рис. 1) квантуется:

$$I_n = [\sin^2(\varphi_{\max}/2)] / [(2\pi n - \varphi_{\max})/2]^2, \quad (1)$$

$$I_0 = [\sin^2(\varphi_{\max}/2)] / (\varphi_{\max}/2)^2, \quad (2)$$

$$I_n = \frac{\sin^2(\pi n/M)}{(\pi n/M)^2} \frac{\sin^2[(2\pi n - \varphi_{\max})/2]}{M^2 \sin^2[(2\pi n - \varphi_{\max})/2M]}, \quad (3)$$

$$I_0 = [\sin^2(\varphi_{\max}/2)] / [M^2 \sin^2(\varphi_{\max}/2M)], \quad (4)$$

где $\varphi_{\max} = 2\pi h_{\max}(n_2 - n_1)/\lambda$ и h_{\max} — максимальные значения фазовой задержки φ и высоты профиля h ; n_1 и n_2 — показатели преломления окружающей среды и материала элемента соответственно; λ — длина волны излучения; n — номер порядка дифракции; M — число уровней квантования. Выражения (1)–(4) получены на основании формул (11) и (13) в [4] и в предположении, что число зон (штрихов) достаточно велико.

Представление распределения интенсивности через φ_{\max} придает анализу единый подход как для пилообразных, так и для ступенчатых структур и позволяет обратить внимание на то, что при двух порядках равной интенсивности (0-м и +1-м) значение $\varphi_{\max}(h_{\max})$ в ступенчатой структуре больше, чем в пилообразной (рис. 2), и зависит от числа ступеней квантования M .

Сравнение параметров дифракционных структур, формирующих два порядка равной интенсивности. На основании условия $I_0 = I_{+1}$ по формулам (1)–(4) можно определить φ_{\max} . Из (1) и (2) следует, что для пилообразной структуры интенсивности двух порядков равны при $\varphi_{\max} = \pi$ (180°). Для вычисления φ_{\max} в ступенчатой структуре необходимо решить следующее уравнение, полученное путем приравнивания правых частей (3) и (4) и в предположении, что $n = 1$ в (3):

$$\sin[(2\pi - \varphi_{\max})/2M] = \frac{\sin(\pi M)}{\pi M} \sin(\varphi_{\max}/2M). \quad (5)$$

Из (5) можно заключить, что φ_{\max} не имеет аналитического выражения и может быть определено графическим или итеративным методом.

В табл. 1 приведены значения φ_{\max} , полученные для структур с фазовыми профилями, представленными на рис. 1, а также значения: 1) коэффициентов $k = 2\pi/\varphi_{\max}$ ($360^\circ/\varphi_{\max}$), показывающих, во сколько раз φ_{\max} меньше полного периода 2π , т. е. задержки в одну длину волны; 2) фазовой задержки φ_{\max}/M , вносимой одной ступенькой; 3) полной глубины травления $h = \frac{\lambda(M-1)}{kM(n_2 - n_1)}$ и высоты одной ступеньки $h_1 = h/(M-1)$, соответствующих излучениям с

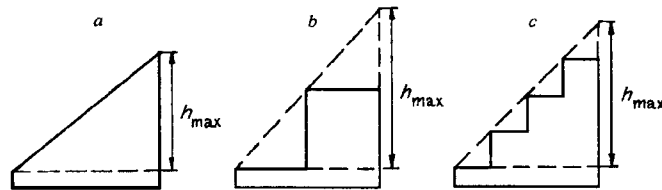


Рис. 2. Профили дифракционных структур, формирующих два порядка равной интенсивности: а — пилообразный, б, с — ступенчатые при $M = 2; 4$

Таблица 1

M	φ_{\max} , град	$k = \frac{360^\circ}{\varphi_{\max}}$	$\varphi = \frac{\varphi_{\max}}{M}$, град	h_D , мкм	$h_{0,555}$, мкм	$\frac{h_D}{M-1}$, мкм	$\frac{h_{0,555}}{M-1}$, мкм
Киноформ	180	2	—	1,9	1,79	1,9	1,79
2	230	1,565	115	1,215	1,145	1,215	1,145
4	190	1,895	47,5	1,5	1,418	0,5	0,473
8	182,4	1,974	22,8	1,685	1,588	0,241	0,227
2	360	1	180	1,9	1,79	1,9	1,79

длинами волн $\lambda_D = 0,589$ мкм (средняя длина волны для видимой области) и $\lambda = 0,555$ мкм (область максимальной чувствительности глаза). Параметры материала и окружающей среды, выбранные для расчетов, эквивалентны параметрам искусственного хрусталика из полиметилметакрилата (ПММА) ($n_{2,D} = 1,491$ и $n_{2,0,555} = 1,492$), расположенного в глазной жидкости ($n_{1,D} = 1,336$ и $n_{1,0,555} = 1,337$).

Как показывает анализ (5) и подтверждают конкретные данные табл. 1, при ступенчатой структуре в отличие от пилообразной φ_{\max} превышает π (180°). Наиболее заметно φ_{\max} изменяется при малых значениях M . Например, при $M = 4$ максимальная фазовая задержка $\varphi_{\max} = 190^\circ$. Если положить $\varphi_{\max} = 180^\circ$, как для пилообразной структуры, то равенство интенсивностей в порядках нарушится: $I_0 = 0,43$; $I_{+1} = 0,35$ вместо $I_0 = I_{+1} = 0,38$ при $\varphi_{\max} = 190^\circ$. Таким образом, для получения двух порядков равной интенсивности в ступенчатой структуре должен квантоваться не просто профиль пилообразной структуры, как в случае однофокусных киноформных дифракционных элементов, а пилообразный профиль, максимальная высота которого предварительно рассчитывается из (5). Эта особенность формирования фазовой ступенчатой структуры для двух порядков равной интенсивности ранее не упоминалась в опубликованной литературе [1, 2].

Рассмотрим, как влияют параметры фазового профиля на распределение интенсивности в порядках дифракции. На рис. 1 рядом с формой профиля каждой структуры приводится дифракционный спектр и указываются (в процентах) значения интенсивностей в порядках, соответствующие вычисленным φ_{\max} (см. табл. 1). Видно, что с ростом числа ступеней M интенсивность 0-го и +1-го порядков увеличивается, приближаясь к максимальному значению 0,405, характерному для пилообразной структуры. При $M = 2$; 4 и 8 интенсивность 0-го и +1-го порядков в ступенчатой структуре меньше, чем в пилообразной, соответственно на 12; 2 и 0,5 %. В большинстве практических случаев ограничиваются четырьмя ступенями ($M = 4$), так как с увеличением M возрастают возможные ошибки изготовления. Рис. 1 иллюстрирует также, что с ростом M увеличивается концентрация энергии в центральных порядках, а спектр становится более симметричным относительно средней линии между 0-м и +1-м порядками и похожим на распределение интенсивности для пилообразной структуры (см. 1 на рис. 1).

Следует отметить, что при бинарной структуре и условии $I_0 = I_{+1}$ наблюдается также -1-й порядок дифракции такой же интенсивности, как 0-й и +1-й (см. 2 на рис. 1). Равенство же интенсивностей только двух порядков в бинарной структуре возможно, если $\varphi_{\max} = 2\pi$ (360°) (см. 5 на рис. 1) [5]. При этом выравниваются по интенсивности ± 1 -е порядки ($I_{+1} = I_{-1}$), а 0-й и все четные отсутствуют. Характерно, что в этом случае интенсивности в двух рассматриваемых порядках и полная глубина (высота) профиля h имеют значения, одинаковые с пилообразной структурой (см. табл. 1 и 1, 5 на рис. 1). Кроме того, значения интенсивностей в других порядках пилообразной структуры совпадают со значениями в нечетных порядках бинарной структуры. Таким

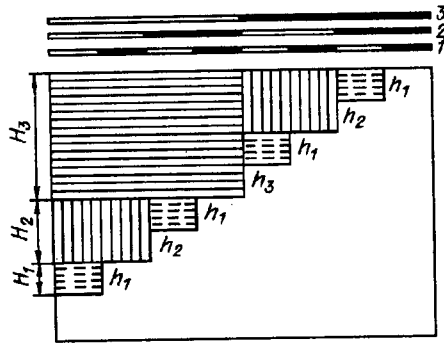


Рис. 3. Формирование фазовой структуры по второму способу при $M = 8$:

H_1 (пунктирная штриховка), H_2 (вертикальная), H_3 (горизонтальная) — глубины травления при 1-й, 2-й и 3-й литографиях; h_1, h_2, h_3 — высоты ступенек, образующихся после 1-й, 2-й и 3-й литографий; в верхней части рисунка показаны формы фотошаблонов

при равной световой эффективности, ее применение в гибридной интраокулярной оптике и в бифокальных микрообъективах [5] проблематично. Это объясняется тем, что в бинарной структуре отклоняются оба порядка равной интенсивности (+1-й и -1-й) и компенсация aberrаций рефракционного компонента дифракционным в одном порядке будет сопровождаться возрастанием aberrаций в другом.

Данные табл. 1 и рис. 1 рассчитаны для идеального профиля, когда каждая ступенька составляет $\varphi = \varphi_{\max}/M$, а φ_{\max} соответствует значению, определенному из условия $I_0 = I_{+1}$. Однако в процессе изготовления возникают ошибки. Если профиль формируется не в один прием ($M > 2$), то интересно рассмотреть возможность корректировки ошибок предыдущих фотолитографий на последующих ступенях.

Корректировка фазовой задержки в процессе изготовления. Существует, как известно, два способа формирования профиля [6]. В первом случае подложка последовательно травится на каждом этапе на глубину φ_{\max}/M и требуется $m = (M - 1)$ шаблонов. Во втором (при условии, что число ступеней кратно 2 и равно $M = 2^m$) глубина каждого следующего травления увеличивается пропорционально степени 2^{m-1} . Таким образом, число шаблонов m уменьшается ($m = \log_2 M$) и, следовательно, сокращается время изготовления элемента. Далее будет рассматриваться только второй метод, который обычно применяется на практике.

На рис. 3 показана структура, полученная последовательным травлением по второму методу, в том числе и при отступлении фазовой задержки или высоты ступеньки h ($h = \frac{\varphi\lambda}{2\pi(n_2 - n_1)}$) от значения, кратного $\varphi = \varphi_{\max}/M$ или $h = h_{\max}/M$, а φ_{\max} и h_{\max} — от значения, при котором $I_0 = I_{+1}$. Обозначим фазовую задержку, соответствующую глубине первого травления ψ_1 , второго — ψ_2 и т. д. (на рис. 3 H — глубина травления, $H_m = \frac{\varphi_m\lambda}{2\pi(n_2 - n_1)}$), а фазовые задержки ступеней, добавляющихся после каждого травления, — $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$. Тогда можно записать, что

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \varphi_1, \\ \psi_2 &= \psi_1 + \varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_2, \\ \psi_3 &= \psi_1 + \psi_2 + \varphi_3 = 2\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3, \\ &\vdots \\ \psi_m &= \left[\sum_{i=1}^{i=m-1} \psi_i \right] + \varphi_m. \end{aligned} \quad (6)$$

При таком представлении фазовой задержки выражения (3) и (4) преобразуются в (7) и (8):

$$I_n = \frac{\sin^2(\pi n/M)}{(\pi n/M)^2} \prod_{m=1}^{m=\log_2 M} \cos^2 \left[\frac{2^{m-1} \pi n}{M} - \frac{\psi_m}{2} \right], \quad (7)$$

$$I_0 = \prod_{m=1}^{m=\log_2 M} \cos^2(\psi_m/2). \quad (8)$$

Если все ступеньки выполнены одинаково, то $\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_m = \varphi_{\max}/M$, $\psi_m = 2^{m-1} \varphi_{\max}/M$, а (7) и (8) переходят в (9) и (10):

$$I_n = \frac{\sin^2(\pi n/M)}{(\pi n/M)^2} \prod_{m=1}^{m=\log_2 M} \cos^2 \left[2^{m-2} (2\pi n - \varphi_{\max})/M \right], \quad (9)$$

$$I_0 = \prod_{m=1}^{m=\log_2 M} \cos^2(2^{m-2} \varphi_{\max}/M). \quad (10)$$

Положим, например, $M = 4$, тогда $m = 2$ и формулы (7), (8) принимают вид:

$$I_n = \frac{\sin^2(\pi n/4)}{(\pi n/4)^2} \cos^2[(\pi n/4) - (\psi_1/2)] \cos^2[(\pi n/2) - (\psi_2/2)], \quad (11)$$

$$I_0 = \cos^2(\psi_1/2) \cos^2(\psi_2/2). \quad (12)$$

Предположим далее, что значения φ_{\max} и $\varphi = \varphi_{\max}/M$ определены из условия $I_0 = I_{+1}$, а значения I_0 и I_{+1} вычислены затем по (3) и (4). Если ψ_1 выполнено с ошибкой, тогда, чтобы сохранить значение I_0 , можно найти необходимые значения ψ_2 и глубины травления h_2 для второй литографии, подставляя ψ_1 и I_0 в (12):

$$\psi_2 = 2 \arccos[\sqrt{I_0}/\cos(\psi_1/2)], \quad (13)$$

$$h_2 = \lambda \psi_2 / [2\pi(n_2 - n_1)]. \quad (13a)$$

Аналогично (13) и (13a) можно продолжать коррекцию глубины травления для последующих литографий, когда $M > 4$ и $m > 2$.

Оценка влияния ошибок изготовления профиля на отклонение интенсивностей ΔI_0 и ΔI_1 от расчетных значений. Дифференцируя (8), получим выражение полного дифференциала для ΔI_0 :

$$\Delta I_0 = -\frac{1}{2} \sum_{m=1}^{m=\log_2 M} (\sin \psi_m) \left\{ \left[\prod_{i=1}^{i=\log_2 M} \cos^2(\psi_i/2) \right] / \cos^2(\psi_m/2) \right\} \Delta \psi_m, \quad (14)$$

где $\Delta \psi_m$ — погрешность выполнения фазовой задержки, выраженная в радианах. Представим ψ_m в виде

$$\psi_m = 2^{m-1} \varphi, \quad (15)$$

где $\varphi = \varphi_{\max}/M$, а φ_{\max} определено из условия $I_0 = I_{+1}$. Тогда изменение интенсивности ΔI_0 при отклонении ψ_m от значений (15) составит:

$$\Delta I_0 = -\frac{1}{2} \sum_{m=1}^{m=\log_2 M} \left[\sin(2^{m-1}\varphi) \right] \left\{ \left[\prod_{t=1}^{t=\log_2 M} \cos^2(2^{t-2}\varphi) \right] / \cos^2(2^{m-2}\varphi) \right\} \Delta\psi_m. \quad (16)$$

Положим, например, $M = 4; 8$, что соответствует $\varphi = \varphi_{\max}/4 = 47,5^\circ$ и $\varphi = \varphi_{\max}/8 = 22,8^\circ$ (см. табл. 1). На основании (16) определяем:

$$\Delta I_0 = -0,17\Delta\psi_1 - 0,42\Delta\psi_2 \quad \text{при } M = 4, \quad (17)$$

$$\Delta I_0 = -0,08\Delta\psi_1 - 0,17\Delta\psi_2 - 0,41\Delta\psi_3 \quad \text{при } M = 8. \quad (18)$$

Как видно из (17) и (18), если ступеньки выполняются с одинаковой абсолютной погрешностью $\Delta\psi$, то их влияние на отклонение интенсивности от номинала отличается в 2—5 раз. Чем больше фазовая задержка ψ_m по номиналу (15), тем точность ее выполнения должна быть выше.

На рис. 4, а показаны нормированные графики изменения сомножителей правой части (12) при $M = 4$ для ψ_1 и ψ_2 , соответствующих (15). По этим графикам наглядно прослеживается характер изменения интенсивности при отклонении ψ_m от расчетного значения. Если при первой литографии допущена ошибка $\Delta\psi_1$ в несколько градусов, то при второй должна быть введена поправка $\Delta\psi_2$ в $\sim 2,5$ раза меньше, чем $\Delta\psi_1$, и с обратным знаком в соответствии с различием в крутизне графиков при номинальном значении $\varphi = \varphi_{\max}/4 = 47,5^\circ$. В итоге для $M = 4$ суммарная фазовая задержка (или полная глубина травления) будет больше или меньше номинальной на $0,5\Delta\psi_1$.

На основании (11) при $n = 1$ можно получить формулы для ΔI_{+1} , аналогичные (17) и (18):

$$\Delta I_{+1} = +0,15\Delta\psi_1 + 0,35\Delta\psi_2 \quad \text{при } M = 4, \quad (19)$$

$$\Delta I_{+1} = +0,08\Delta\psi_1 + 0,16\Delta\psi_2 + 0,39\Delta\psi_3 \quad \text{при } M = 8. \quad (20)$$

Из сравнения (17) и (19), (18) и (20) видно, что абсолютные значения коэффициентов при $\Delta\psi_m$ для ΔI_0 и ΔI_{+1} близки друг к другу по значению, но

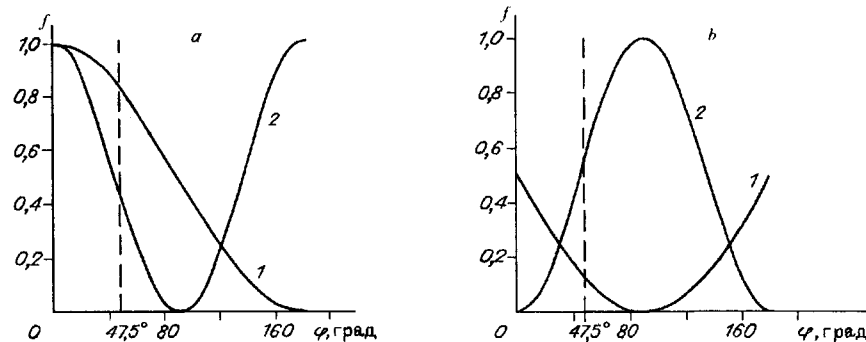


Рис. 4. Графики, характеризующие изменение интенсивностей 0-го (а) и 1-го (б) порядков в соответствии с (12) и (11):

а: 1 - $f(\varphi) = \cos^2(\psi_1/2) = \cos^2(\varphi/2)$; 2 - $f(\varphi) = \cos^2(\psi_2/2) = \cos^2\varphi$; б: 1 - $f(\varphi) = \cos^2[(\psi_1 - 90^\circ)/2] = \cos^2[(\varphi - 90^\circ)/2]$;

2 - $f(\varphi) = \cos^2[(\psi_2 - 180^\circ)/2] = \cos^2(\varphi - 90^\circ)$

имеют обратные знаки. Таким образом, при выполнении глубины последовательного травления в соответствии с (13) одновременно с интенсивностью 0-го порядка будет корректироваться I_{+1} . На рис. 4, б показаны нормированные графики изменения косинусных сомножителей правой части равенства (11) для I_{+1} .

Таблица 2

M	$\Delta\psi = 0,024$ рад (0,05 пол.)		$\Delta\psi = 0,048$ рад (0,1 пол.)	
	$\overline{\Delta I_0}$	$\overline{\Delta I_{+1}}$	$\overline{\Delta I_0}$	$\overline{\Delta I_{+1}}$
4	0,011	0,010	0,022	0,020
8	0,011	0,011	0,022	0,022

Влияние погрешности измерения фазовой задержки на этапах изготовления на интенсивность 0-го и 1-го порядков дифракции. При оценке распределения интенсивности по порядкам необходимо также учитывать принципиальные возможности технологии изготовления структуры. Если фазовая задержка контролируется на микроинтерферометре в отраженном свете, то точность измерения составляет 0,05—0,1 полосы, что соответствует $\Delta h = 0,015—0,03$ мкм. Для элемента из ПММА, помещенного в жидкую среду, это равнозначно точности определения $\Delta\psi = \Delta\psi_1 = \Delta\psi_2 = 1,4—2,8^\circ$ (0,024—0,048 рад). Положим, что фазовый профиль изготовлен без коррекции, но в пределах точности измерений соответствует номинальному значению (15). Тогда ожидаемая среднеквадратическая погрешность может быть рассчитана по формулам (21) на основании коэффициентов при $\Delta\psi$ в (17)—(20):

$$\begin{aligned} \overline{\Delta I_0} &= 0,45\Delta\psi; & \overline{\Delta I_{+1}} &= 0,38\Delta\psi & \text{при } M &= 4, \\ \overline{\Delta I_0} &= 0,45\Delta\psi; & \overline{\Delta I_{+1}} &= 0,43\Delta\psi & \text{при } M &= 8. \end{aligned} \quad (21)$$

В табл. 2 приводятся расчетные значения $\overline{\Delta I_0}$ и $\overline{\Delta I_{+1}}$ для $M = 4; 8$. Из табл. 2 и рис. 1 следует, что при вышеуказанной точности контроля фазовой задержки интенсивности I_0 и I_{+1} для изготовленных элементов могут лежать в пределах:

$$\begin{aligned} I_0 &= 0,382 \mp 0,011 (0,022), \\ I_{+1} &= 0,382 \pm 0,010 (0,020) & \text{при } M &= 4, \\ I_0 &= 0,400 \mp 0,011 (0,022), \\ I_{+1} &= 0,400 \pm 0,011 (0,022) & \text{при } M &= 8. \end{aligned} \quad (22)$$

Заключение. Проведено аналитическое исследование параметров дифракционных структур, обеспечивающих получение двух порядков дифракции равной интенсивности. Показано, что максимальная эффективность в этих порядках достигается при пилообразной структуре и бинарной, глубина которой равна высоте зубцов пилообразной структуры.

Впервые определено, что в случае 0-го и +1-го порядков равной интенсивности высота пилообразного профиля, который квантуется для построения ступенчатой структуры, больше, чем высота просто пилообразного профиля, и зависит от числа ступенек.

Получены аналитические формулы для вычисления скорректированной глубины травления последующих ступенек при ошибочном изготовлении предыдущих. Проведена оценка влияния точности выполнения фазовых задержек на отклонение интенсивностей в порядках от расчетных номинальных значений.

Автор выражает искреннюю признательность В. П. Коронкевичу за обсуждение статьи и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Futhey J. A. Diffractive bifocal intraocular lens // Proc. SPIE. 1989. N 1052.
2. Pat. 5129718 US. Multifocal diffractive ophthalmic lenses /J. A. Futhey, W. B. Isaacson, J. Simpson. Publ. 14.06.92.
3. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // Автометрия. 1985. № 1.
4. Ленкова Г. А. Киноформы. Синтез фазовой структуры и допустимые погрешности. Новосибирск, 1979. (Препр. /ИАиЭ СО АН СССР; 98).
5. Коронкевич В. П., Нагорный В. Н., Пальчикова И. Г. и др. Бифокальный микроскоп с киноформными оптическими элементами // Автометрия. 1987. № 6.
6. Спектор Б. И. Об одном методе синтеза фазовой структуры киноформов // Автометрия. 1985. № 6.

Поступила в редакцию 14 марта 1995 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!