

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 617.741 : 535.4

ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫЕ ХРУСТАЛИКИ ГЛАЗА С БИНАРНЫМИ СТРУКТУРАМИ*

Г. А. Ленкова

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: sedukhin@iae.nsk.su*

Проведён краткий аналитический обзор работ, в которых рассматриваются особенности применения простейших бинарно-фазовых дифракционных структур в мультифокальных искусственных хрусталиках глаза (интраокулярных линзах) для расширения фокальной области. Приводятся результаты теоретического исследования влияния сферических аберраций глаза, оптической силы диафрагмы (диаметра зрачка) и скважности структуры на глубину фокуса (пределы чёткого видения). Анализируется распределение интенсивности по порядкам дифракции (фокусам) в простейших бинарных дифракционно-рефракционных интраокулярных линзах.

Ключевые слова: интраокулярные линзы, дифракционно-рефракционные хрусталики глаза, бинарные дифракционные структуры, зрачок, скважность структуры, глубина фокуса.

DOI: 10.15372/AUT20180507

Введение. При имплантации искусственных хрусталиков глаза (интраокулярных линз (ИОЛ)) почти полностью теряется естественная аккомодация глаза, т. е. способность непрерывной перефокусировки на разные расстояния. В случае однофокусных ИОЛ восстанавливается зрение вдаль, а для ближнего расстояния пациенту необходимы очки. Проблема расширения пределов аккомодации решается путём создания мультифокальных рефракционных и дифракционно-рефракционных (гибридных) ИОЛ, среди которых особый интерес представляют ИОЛ с дифракционными компонентами.

Дифракционно-рефракционные ИОЛ состоят из двояковыпуклой или плоско-выпуклой линзы (рефракционный элемент) и фазовой кольцевой микроструктуры (дифракционный элемент (ДЭ)), формируемой на одной из поверхностей линзы. Рефракционный, базовый, элемент создаёт главный фокус ИОЛ, а совместно с дифракционным элементом — ещё один или несколько дополнительных фокусов.

Дифракционный элемент ИОЛ имеет обычно пилообразный (киноформный) профиль, подобный фазовой линзе Френеля (с вариацией задержки волны, равной её оптической длине), или бинарный, подобный фазовой зонной пластинке. Бифокальные ИОЛ с киноформным элементом формируют два фокуса: 0-й (зрение вдаль) и +1-й (зрение вблизи). Преимущество их в том, что, благодаря удачному сочетанию низкой и высокой оптических сил дифракционного и рефракционного элементов с противоположной зависимостью фокусных расстояний элементов от длины волны, в +1-м фокусе компенсируются хроматические аберрации. Такая ИОЛ была разработана, например, в лаборатории дифракционной оптики Института автоматики и электрометрии СО РАН под названием МИОЛ-Аккорд

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (государственная регистрация № АААА-А17-117052210002-7).

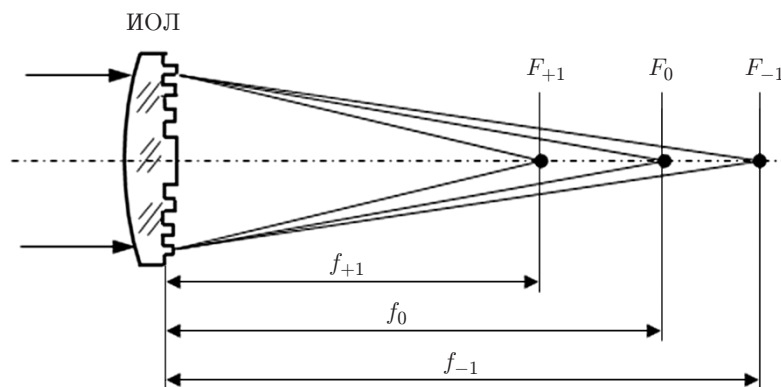


Рис. 1

[1]. В отличие от зарубежного метода алмазного точения кварцевая матрица для дифракционной структуры МИОЛ-Аккорд изготавливается путём прямой лазерной записи в фоторезисте и методом реактивного ионно-плазменного травления. Кроме того, в структуре предусмотрена компенсация сферических aberrаций глаза.

Пациенты с бифокальными ИОЛ имеют хорошую остроту зрения вдаль и вблизи, но значительно сниженную на промежуточном расстоянии, важном, например, для работы на компьютере. Для решения проблемы создаются мультифокальные ИОЛ, позволяющие расширять глубину фокуса или сформировать дополнительные фокусы. В последнем случае возможно применение простейших бинарных структур (рис. 1), которые в отличие от киноформных позволяют получать три фокуса (-1 , 0 и $+1$ -й), причём простым путём — выбором глубины профиля [2]. Средний фокус обеспечивает зрение в промежутке между дальними и ближними объектами. Технология изготовления бинарных структур менее сложная, чем киноформных. Обычно она основана на методах фотолитографии. Но в отрицательном фокусе будут увеличиваться некомпенсированные хроматические aberrации [3]. Кроме того, для использования полного интервала оптических сил бинарной структуры необходимо увеличивать оптическую силу рефракционной части ИОЛ на половину этого интервала, так как в зрении вдаль будет участвовать отрицательная оптическая сила дифракционного элемента.

В некоторых конструкциях дифракционно-рефракционных ИОЛ для увеличения глубины фокуса предлагается увеличивать диаметр центральной зоны бинарной дифракционной структуры [1]. В противоположность этому в известных моделях ИОЛ с киноформными структурами, например в МИОЛ-Аккорд и AcrySof[®] ReSTOR[®] (США), центральную зону уменьшают [4] для того, чтобы увеличить число зон при малых размерах зрачка и избежать возможности превращения ИОЛ в монофокальную линзу.

Цель данной работы — проведение аналитического обзора исследований особенностей применения бинарной бифокальной дифракционной структуры (роли диафрагмы, диаметра зрачка, aberrаций, скважности структуры) для расширения фокальной области дифракционно-рефракционных ИОЛ. Такие структуры существенно легче изготавливать и контролировать.

Связь глубины фокуса с оптической силой диафрагмы. Глубина резкости (фокальная глубина) оптической системы определяется величиной смещения $\pm\Delta z$ вдоль оптической оси относительно фокуса, в пределах которого качество изображения остаётся достаточно хорошим. Наиболее широко используемым критерием для установления глубины фокуса Δz является приращение волновой aberrации на $\lambda/4$ или уменьшение интенсивности на оси на 20 % относительно максимума [5], что соответствует

$$\Delta z = \pm(1/2)\lambda f^2/(n_1 a^2) = \pm 2\lambda f^2/(n_1 d^2) = \pm(f^2/n_1)(\Phi_d/2), \quad (1)$$

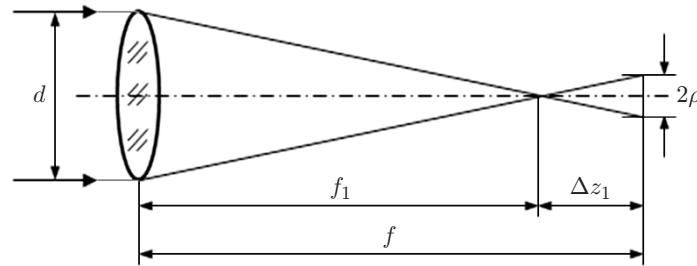


Рис. 2

где a и d — радиус и диаметр апертуры (зрачка); λ — длина световой волны в вакууме; n_1 — показатель преломления среды; f — фокусное расстояние; Δz — расстояние от фокуса до точки наблюдения; Φ_d — оптическая сила диафрагмы. Правая часть (1) получена путём сравнения Δz с приближённым выражением Φ_d из [6]:

$$\Phi_d = 4\lambda/d^2. \quad (2)$$

Более точные, но более сложные выражения для Φ_d можно найти в работе [7].

Известно, что разрешающая способность оптической системы определяется как полуширина ρ функции рассеяния точки в фокальной плоскости:

$$\rho = \lambda f/(n_1 d). \quad (3)$$

Оказывается, если провести лучи, соединяющие края диафрагмы с противоположными нулевыми значениями функции рассеяния точки (рис. 2), то они пересекаются на расстоянии Δz_1 от фокуса, которое совпадает с Δz :

$$\Delta z_1 = 2\rho f/d = 2\lambda f^2/(n_1 d^2) = (f^2/n_1)(\Phi_d/2). \quad (4)$$

Это исключительно геометрическое совпадение позволяет оценить глубину фокуса реального глаза на основе экспериментальных (ρ_r) и теоретических (ρ_t) значений разрешающей способности глаза, приведённых в [8]. Из экспериментальных и теоретических данных следует, что при малых диафрагмах (до 1,5 мм) разность ($\rho_r - \rho_t$) постоянна и обусловлена только мозаичным строением сетчатки (размером колбочек), а далее увеличивается из-за неоднородностей хрусталика и сферических aberrаций глаза (табл. 1).

Исходя из (2) и (4), оптическая сила $\Delta\Phi$ в пределах глубины фокуса изменяется согласно соотношению

$$\Delta\Phi = n_1/f - n_1/f_1 = \pm\Delta z_1 n_1/f^2 = \pm 2\lambda/d^2 = \pm\Phi_d/2, \quad (5)$$

Таблица 1

d , мм	ρ_r , угл. с	ρ_t , угл. с	ρ_r/ρ_t	$(\rho_r - \rho_t)$, угл. с	$2\Delta\Phi = \Phi_d$, дптр	Φ_d (ρ_r/ρ_t), дптр
0,6	225	190	1,2	35	6,2	7,3
0,8	178	143	1,3	35	3,5	4,3
1,0	149	114	1,3	35	2,2	2,9
1,5	128	76	1,7	52	1,0	1,7 (1,0)
2,0	137	57	2,4	80	0,6	1,3 (0,6)
3,0	167	38	4,4	129	0,3	1,1 (0,4)
4,0	199	29	7,0	170	0,2	1,0 (0,3)
5,0	223	23	9,8	200	0,1	0,9 (0,4)

где $f_1 = f \pm \Delta z_1$. Из (5) следует, что полное изменение оптической силы (полная глубина фокуса) равно $2\Delta\Phi$, т. е. оптической силе диафрагмы. В табл. 1 приводятся значения Φ_d , рассчитанные по формуле (2) для $\lambda = 0,555$ мкм. Используя прямую теоретическую зависимость между Φ_d и ρ в (4), можно оценить полную глубину фокусировки глаза с естественным хрусталиком в виде $\Phi_d (\rho_r/\rho_t)$, которая представлена в последней колонке табл. 1. Зрачок глаза может принимать значения от 1,5 до 7 мм, но преимущественно от 2 до 5 мм. Из таблицы видно, что в последнем случае Φ_d изменяется от 0,6 до 0,1 дптр, а с учётом реальной разрешающей способности глаза глубина фокуса составляет ~ 1 дптр (от 1,3 до 0,9 дптр), т. е. без аккомодации нормальный глаз видит от бесконечности приблизительно до 1 м. Следует отметить, что при малых диафрагмах (от 0,6 до 1,5 мм) глубина фокуса, обусловленная оптической силой диафрагмы, достигает довольно больших значений (от 6 до 1 дптр) [9]. Последнее может быть использовано для расширения фокуса путём создания искусственных диафрагм как рассеивающих элементов, например, за счёт уменьшения диаметра центральной зоны дифракционного компонента.

При замене естественного хрусталика интраокулярной линзой устраняется влияние неоднородности хрусталика и глубина фокусировки становится равной $\sim 0,5$ дптр (значения в скобках в табл. 1), т. е. от бесконечности приблизительно до 2 м. Чтобы видеть на расстоянии 30–60 см или, по другим данным, на расстоянии 40–80 см, необходимы очки в 3,3–1,7 дптр или 2,5–1,3 дптр соответственно [10]. В бифокальных и мультифокальных ИОЛ эту задачу выполняют дифракционные элементы.

Хроматические aberrации бинарной дифракционной структуры. Значения радиусов r_k , диаметров d_k и числа зон k бинарной структуры (здесь зонами считаются все элементы структуры независимо от фазы) (рис. 3) определяются по известным формулам зонной пластинки:

$$r_k^2 = f_{DЭ} k \lambda / n_1; \quad d_k^2 = 4k \lambda / \Phi_{DЭ}; \quad k = d_k^2 \Phi_{DЭ} / (4\lambda), \quad (6)$$

где $f_{DЭ}$ и $\Phi_{DЭ}$ — фокусное расстояние и оптическая сила дифракционного элемента. В табл. 2 приведены значения диаметров 1-й (центральной) зоны d_1 и числа зон k при диаметрах зрачка d от 1 до 5 мм и характерных оптических силах $\Phi_{DЭ}$ дифракционного элемента от 1 до 4 дптр. В скобках указаны значения оптической силы соответствующих очковых линз, которые приблизительно в 1,2–1,4 раза меньше, чем $\Phi_{DЭ}$, а ниже — расстояния до объекта в сантиметрах.

Как указывалось выше, недостаток бинарной структуры в том, что в отрицательном фокусе (в -1 -м порядке) хроматическая aberrация $\Delta\Phi_{CF} = \Phi_C - \Phi_F$ не компенсируется, а увеличивается [3]. Индексы C и F показывают отношение оптической силы к стандартным длинам волн $\lambda_C = 0,6563$ мкм и $\lambda_F = 0,4861$ мкм. Aberrация $\Delta\Phi_{CF}$, рассчитанная для модели глаза с монофокальной ИОЛ, имеет отрицательный знак и составляет $-0,95$ дптр [3]. Для дифракционного компонента aberrация $(\Delta\Phi_{CF})_{DЭ}$ зависит от знака $\Phi_{DЭ}$:

$$(\Delta\Phi_{CF})_{DЭ} = \Phi_{DЭ} (\Delta\lambda_{CF} / \lambda_0), \quad (7)$$

где $\Delta\lambda_{CF} = \lambda_C - \lambda_F$, $\lambda_0 = \lambda = 0,555$ мкм, $\Delta\lambda_{CF} / \lambda_0 = 0,307$. В табл. 3 приведены значения $(\Delta\Phi_{CF})_{DЭ}$, рассчитанные для четырёх положительных и отрицательных $\Phi_{DЭ}$. Из таблицы

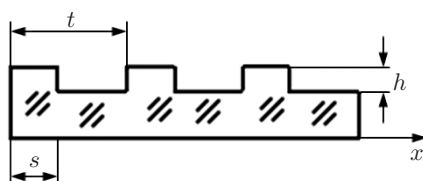


Рис. 3

Таблица 2

d , мм	$\Phi_{ДЭ}$, дптр				
	1 (0,8) 125 см	1,5 (1,2) 83 см	2 (1,5) 67 см	3 (2,3) 43 см	4 (3,1) 31 см
	d_1 , мм				
	1,5	1,2	1,1	0,9	0,8
k					
1	0,5	0,7	0,9	1,4	1,8
1,5	1	1,5	2	3	4
2	1,8	2,7	3,6	5,4	7,2
3	4	6,1	8	12	16
4	7,2	10,8	14,4	21,6	28,8
5	11,3	16,9	22,5	33,9	45,2

Таблица 3

$\Phi_{ДЭ}$, дптр	$(\Delta\Phi_{CF})_{ДЭ}$, дптр
+1	+0,31
+1,5	+0,46
+2	+0,62
+3	+0,93
+4	+1,24
-1	-0,31
-1,5	-0,46
-2	-0,62
-3	-0,93
-4	-1,24

видно, что при отрицательных значениях $\Phi_{ДЭ} > |-2|$ дптр aberrация $(\Delta\Phi_{CF})_{ДЭ}$ имеет одинаковый знак с aberrацией $\Delta\Phi_{CF}$ монофокальной ИОЛ и приближается к ней или становится больше по величине. Следовательно, в этой области значений $\Phi_{ДЭ}$ суммарная хроматическая aberrация бифокальной ИОЛ возрастает примерно в 2 раза и более. Понятно, что оптическая сила дифракционного компонента должна быть меньше 1 дптр, чтобы хроматическая aberrация увеличивалась незначительно. В то же время, чтобы обеспечить хорошее зрение на расстоянии $\sim(30-60)$ см или $\sim(40-80)$ см, необходим бинарный дифракционный элемент с оптической силой $\Phi_{ДЭ} = 2$ или 1,5 дптр (см. табл. 2). Далее покажем ещё одну возможность увеличения глубины фокуса бинарной структуры.

Зависимость интенсивности в фокусах от скважности структуры. Известно, что распределение интенсивности света по порядкам дифракции (т. е. количество энергии в каждом n -м порядке) имеет одинаковое выражение для кольцевых (с квадратичной зависимостью от радиуса зоны (см. рис. 1)) и линейных (см. рис. 3) структур, но в последнем случае его вывод проще [11, формулы (15), (16)]. Для кольцевых структур это распределение относится к интенсивностям света в фокусах n -го порядка, а для линейных — к интенсивностям световых пучков, дифрагированных в n -й порядок.

Рассмотрим, как влияет скважность $c = s/t$ фазовой бинарной структуры на распределение интенсивности $I(n)$ (см. рис. 3, t и s — период и ширина фазовой ступеньки). После прохождения плоского волнового фронта единичной амплитуды через структуру комплексная амплитуда A в дальней зоне в n -м порядке дифракции может быть представлена в виде

$$A = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \int_{k-1}^k G(x) e^{-i\omega x} dx. \quad (8)$$

Здесь K — общее число периодов структуры (штрихов); k — порядковый номер периода (штриха) (в отличие от (6), где k — номер зоны); $\omega = 2\pi n$ — пространственная частота, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ — номер порядка дифракции; x — координата в значениях периода структуры в направлении, перпендикулярном к границам зон; $G(x)$ имеет следующий вид:

$$G(x) = G_1(x) + G_2(x), \quad (8a)$$

$$G_1(x) = e^{i\varphi} \quad \text{при } (k-1) \leq x \leq [(k-1) + c], \quad (8б)$$

$$G_2(x) = 1 \quad \text{при } [(k-1) + c] \leq x \leq k, \quad (8\text{в})$$

где $G_1(x)$ и $G_2(x)$ соответствуют участкам с шириной s и $(t-s)$; φ — фазовая задержка на участке s (см. рис. 3):

$$\varphi = 2\pi h(n_2 - n_1)/\lambda \quad (9)$$

(n_1 и n_2 — показатели преломления среды и материала структуры, h — высота фазовой ступеньки).

Интегрируя (8), получаем после некоторых преобразований выражение комплексной амплитуды в виде произведения

$$A = \frac{\sin(\pi n K)}{K \sin(\pi n)} \frac{\sin(\pi n c)}{(\pi n c)} c \left[e^{i\varphi} + \frac{\sin[\pi n(1-c)]}{\sin(\pi n c)} e^{i\pi n} \right]. \quad (10)$$

В (10) первый член характеризует результат интерференции световых пучков от K штрихов структуры, второй — результат дифракции на минимальном элементе решётки s , третий — скважность структуры c , четвёртый — результат сложения колебаний с интенсивностями 1 и $\sin[\pi n(1-c)]/\sin(\pi n c)$ и соответствующими фазами φ и πn в пределах одного периода t . Если первые три составляющие одинаковы для любых структур с равными скважностями $c = s/t$, то четвёртая зависит от значений фазовой задержки.

Умножая (10) на сопряжённое выражение, получаем распределение интенсивности $I(n)$, которое может быть представлено как произведение трёх функций [12]:

$$I(n) = F(n)W(n)P(n), \quad (11)$$

$$F(n) = \frac{\sin^2 \pi n K}{K^2 \sin^2 \pi n}, \quad (11\text{а})$$

$$W(n) = \frac{\sin^2(\pi n c)}{(\pi n c)^2}, \quad (11\text{б})$$

$$P(n) = c^2 \left[1 + \frac{\sin^2[\pi n(1-c)]}{\sin^2(\pi n c)} + 2 \frac{\sin[\pi n(1-c)]}{\sin(\pi n c)} \cos(\varphi - \pi n) \right]. \quad (11\text{в})$$

Здесь $F(n)$ — гребенчатая функция, которая не зависит от скважности и имеет значения равные 1 при целых n ; $W(n)$ — нормированная огибающая функция типа $(\sin x/x)^2$, которая зависит от скважности c и имеет главный максимум, равный 1, при $n = 0$ и нулевые значения при $n = m/c$ ($m = 1, 2, \dots$); $P(n)$ — модулирующая интерференционная функция, которая характеризует взаимодействие световых полей в пределах одного периода и имеет только два выражения:

$$P_0 = c^2 + (1-c)^2 + 2c(1-c) \cos \varphi, \quad (11\text{г})$$

$$P_n = 4c^2 \sin^2(\varphi/2), \quad (11\text{д})$$

где P_0 и P_n — виды функции $P(n)$ при $n = 0$ и $n = \pm 1, 2, \dots$ соответственно, следовательно, во всех порядках, кроме нулевого, функция $P(n)$ имеет одинаковое значение.

Необходимо отметить особенность распределения интенсивности, которая носит в оптике название принципа Бабине [13]. В зависимости от условия $s/t \leq 1/2$ или $s/t > 1/2$

Таблица 4

c	$W(n)$							P_0		P_n	
	n							$\varphi = 180^\circ$	$\varphi = 115^\circ$	$\varphi = 180^\circ$	$\varphi = 115^\circ$
	0	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6				
1/2	1	0,405	0	0,045	0	0,016	0	0	0,289	1	0,711
1/3	1	0,684	0,171	0	0,043	0,027	0	0,111	0,368	0,444	0,316
1/4	1	0,811	0,495	0,09	0	0,032	0,045	0,25	0,467	0,25	0,178

минимальным элементом структуры, определяющим пределы центрального максимума функции $W(n)$, будет s или $(t - s)$. Интенсивность в ненулевых порядках будет зависеть от s/t в первом и от $(t - s)/t$ во втором случае. При увеличении s/t , начиная со значения $1/2$, интенсивность будет изменяться зеркально, как если бы s/t уменьшалось, что соответствует увеличению $(t - s)/t$.

Из (11)–(11д) можно заключить, что взаимное отношение интенсивностей ненулевых порядков не зависит от величины фазовой задержки и равно отношению произведений функций $F(n)$ и $W(n)$, так как для интенсивностей в этих порядках $P(n) = P_n$. Это очень важное следствие, потому что позволяет по отношению интенсивностей, например, в 1-м и 2-м порядках определять скважность решётки s/t независимо от других параметров.

В соответствии с формулой (11) наиболее интенсивные дифракционные порядки локализируются в пределах, ограниченных первыми нулевыми значениями функции $W(n)$ при $n = t/s$. Очевидно, что практическое значение имеет только та часть дифракционного спектра, в которой сосредоточено более 80 % энергии. В табл. 4 приведены значения $W(n)$, P_0 и P_n , а в табл. 5 — произведения $W(n)P(n)$, которые фактически являются дифракционными эффективностями в фокусах при $\varphi = \pi = 180^\circ$ и $\varphi = 115^\circ$. Дифракционные порядки в пределах, ограниченных первыми нулевыми значениями функции $W(n)$, выделены жирным шрифтом.

Если $\varphi = \pi$, то из (11г) и (11д) следует, что $P_0 = (2c - 1)^2$ и $P_n = 4c^2$. В этом случае при $c = 1/2$ отсутствует 0-й порядок. При отклонении скважности от значения $c = 1/2$ появляются дополнительные фокусы более высокого порядка, чем ± 1 -й, а при $\varphi = \pi$ — также 0-й порядок. Увеличение или уменьшение фазовой задержки относительно $\varphi = \pi$ приводит к увеличению интенсивности в 0-м порядке и уменьшению во всех остальных порядках. Для иллюстрации на рис. 4 показаны спектры порядков при изменении скважности ($c = 1/2, 1/3, 1/4$) и фазовой задержки ($\varphi_1 = \pi = 180^\circ, \varphi_2 = 115^\circ$). В принципе, дополнительные порядки, возникающие при уменьшении скважности, могут использоваться для расширения глубины фокуса ИОЛ, но за счёт снижения интенсивности света в каждом фокусе.

При рассмотрении распределения интенсивности предполагалось, что общее число штрихов K (зон) достаточно велико (порядка 10). Только в этом случае можно считать, что $F(n)$ — гребенчатая функция, имеющая значения равные 1 при целых значениях n

Таблица 5

c	$W(n)P(n), \varphi = 180^\circ$					$W(n)P(n), \varphi = 115^\circ$				
	n					n				
	0	± 1	± 2	± 3	$\sum_n W_n P_n$	0	± 1	± 2	± 3	$\sum_n W_n P_n$
1/2	0	0,405	0	—	0,81	0,289	0,288	0	0,029	0,87
1/3	0,111	0,304	0,076	0	0,87	0,368	0,216	0,054	0	0,91
1/4	0,25	0,203	0,124	0,023	0,95	0,467	0,144	0,078	0,016	0,93

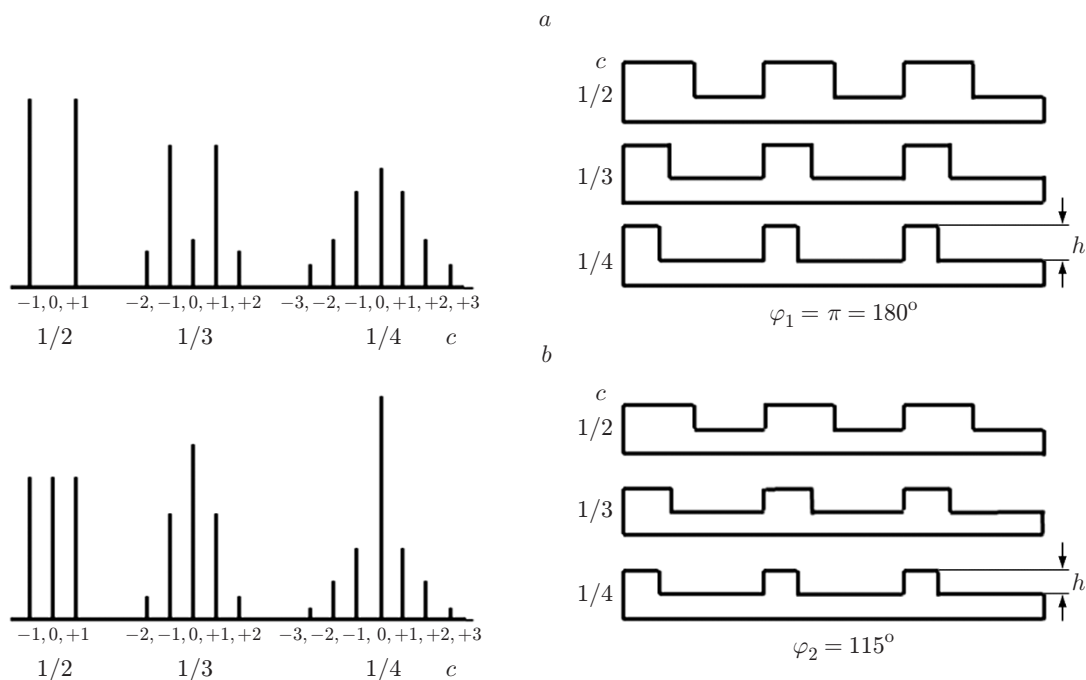


Рис. 4

и близкие к 0 в промежутках. При малом числе штрихов (зон) $F(n)$ не будет бесконечно узкой. Например, если в зрачке две зоны, то эта функция будет представлять синусоиду подобно интерференции от двух щелей, если больше двух зон (три, четыре и т. д.), то между основными максимумами появляются дополнительно слабые максимумы (один, два и т. д.), интенсивность которых уменьшается с увеличением числа зон. Следовательно, уменьшение числа зон ведёт к некоторому расширению фокальных областей.

В бифокальных ИОЛ МИОЛ-Аккорд и АссуСоф[®] ReSTOR[®] центральная зона дифракционного элемента уменьшена за счёт фазового сдвига, вносимого в структуру зон (т. е. без изменения его оптической силы) в целях увеличения числа зон при малых диаметрах зрачка [1]. Эти линзы имеют киноформную дифракционную структуру и диаметр центральной зоны в них в $\sqrt{2}$ ($\simeq 1,4$) раза больше, чем в бинарной структуре. Например, при одной и той же оптической силе дифракционного компонента $\Phi_{ДЭ} = 1,5-2$ дптр в бинарной структуре центральная зона составляет 1,2–1,1 мм (см. табл. 2), а в киноформной — 1,54–1,68 мм, что сравнимо с минимальным размером зрачка и может быть причиной потери бифокального свойства при уменьшении диаметра зрачка. Таким образом, в бинарных структурах ситуация менее критична, тем более что центральная зона может быть ещё уменьшена, если скважность меньше 1/2.

В [4] для увеличения глубины фокуса дифракционно-рефракционной ИОЛ предлагается, наоборот, расширять центральную зону бинарного элемента, что, вероятно, можно сравнить с отклонением скважности от значения 1/2, но только в центральной части. Высота фазовой ступеньки элемента в [4] равна π . В этом случае при расширении центральной зоны между +1-м и -1-м фокусами появляется 0-й фокус, что приводит к увеличению фокальной области. Такой же эффект можно получить путём уменьшения фазовой задержки или скважности (см. рис. 4) причём без расширения центральной зоны, которое может привести при малых диаметрах зрачка к превращению дифракционно-рефракционной ИОЛ в монофокальную линзу.

О результатах применения бинарной структуры в ИОЛ сообщается, например, в работе [14]. Дифракционный элемент рассчитан на расстояния от глаза 25 и 50 см, соответст-

вующие оптической силе очков в 4 и 2 дптр. На основании указанного диаметра первой (центральной) зоны, равного 0,860 мм, и формулы (6) можно определить, что оптическая сила дифракционного компонента составляет $\pm 2,95$ дптр. Из табл. 3 видно, что расчётная хроматическая aberrация такого элемента в -1 -м порядке (фокусе) составляет около $-0,93$ дптр, что соответствует знаку и порядку aberrации глаза с монофокальной ИОЛ, равной $-0,95$ дптр [3]. Следовательно, полная хроматическая aberrация глаза увеличится в 2 раза. Тем не менее результаты испытаний [14] в общем положительные, пациенты удовлетворены состоянием зрения. Но отмечается, что в ночные часы часть пациентов (25 %) видела гало, которое уменьшилось в 2 раза через некоторое время после операции. Чем вызвано гало: рассеянием света, сферическими или хроматическими aberrациями, — не объясняется. В [15] предлагается для расширения фокальной области ИОЛ применять бинарный фазовый элемент низкой пространственной частоты, обеспечивающий непрерывную перефокусировку в пределах 3 дптр, т. е. от бесконечности до 33 см. Подробности о форме структуры дифракционного компонента не сообщаются. Исследования ИОЛ с этим элементом проводились в модели глаза на оптической скамье. Получено достаточно хорошее качество изображения. Контраст модуляционной передаточной функции составляет не менее 25 % при разрешающей способности 25 линий/мм во всём измеряемом интервале положений объекта.

Заключение. В данной работе рассмотрено влияние диаметра зрачка глаза на фокальную глубину. Показано, что полная глубина фокуса оптической системы совпадает по величине с оптической силой диафрагмы (зрачка). При обычных диаметрах зрачка от 2 до 5 мм глубина фокуса глаза с монофокальной ИОЛ, обусловленная диафрагмой, меньше 1 дптр, что недостаточно для ближнего зрения. Эта проблема может быть решена путём применения бифокальных и мультифокальных ИОЛ с дифракционными компонентами. Оптическая сила диафрагм малых диаметров (от 0,6 до 1,5 мм) достигает довольно больших значений (от 6 до 1 дптр). Последнее может быть использовано для расширения фокуса путём создания искусственных диафрагм в виде фазовых ступенек как рассеивающих элементов, например, за счёт уменьшения диаметра центральной зоны или ширины ступенек дифракционного компонента ИОЛ.

Показано, что расширение фокальной области возможно при отклонении скважности структуры от значения $1/2$ и уменьшения оптической силы дифракционного компонента. В первом случае это обусловлено появлением дополнительных фокусов, а во втором — уменьшением общего числа зон в пределах зрачка. Увеличение или уменьшение глубины фазовой ступеньки структуры относительно $\varphi = \pi$ приводит к увеличению интенсивности в 0-м и уменьшению во всех остальных дифракционных порядках (фокусах).

Отмечено, что применение бинарной фазовой структуры для расширения глубины фокуса дифракционно-рефракционных ИОЛ может привести к значительному увеличению хроматических aberrаций глаза, если оптическая сила структуры больше 2 дптр. Необходимо также принимать во внимание, что для использования полного интервала оптических сил бинарной структуры ($+1, 0$ и -1 -й фокусы) оптическая сила рефракционной части ИОЛ должна быть увеличена на половину этого интервала, поскольку в процессе зрения вдаль участвует отрицательная оптическая сила дифракционного компонента. В таком случае лучше применять в ИОЛ дифракционные компоненты с низкой оптической силой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Корольков В. П., Исаков И. А. Бифокальные дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы // Оптический журнал. 2007. 74, № 12. С. 34–39.

2. **Pat. 5344447 US.** Diffractive trifocal intraocular lens design /G. J. Swanson. Заявка 06.09.1994. Приоритет 12.11.1992.
3. **Ленкова Г. А.** Хроматические аберрации модели глаза с дифракционно-рефракционными интраокулярными линзами // Автометрия. 2009. **45**, № 2. С. 99–114.
4. **Pat. 8747466 US.** Intraocular lens having extended depth of focus /Н. А. Weeber, P. Piers. Заявка 10.06.2014. Приоритет 27.08.2007.
5. **Бетенси Э., Хопкинс Р., Шеннон Р. и др.** Проектирование оптических систем. М.: Мир, 1983. 432 с.
6. **Ленкова Г. А.** О фокальном сдвиге и фазовой линзе Френеля // Оптика и спектроскопия. 2011. **111**, № 1. С. 107–114.
7. **Пальчикова И. Г., Раутиан С. Г.** Дифракционная оптическая сила круглой и квадратной диафрагм // Автометрия. 1999. № 5. С. 12–19.
8. **Максутов Д. Д.** Астрономическая оптика. Л.: Наука, 1979. 395 с.
9. **Бесмельцев В. П., Баев С. Г., Пальчикова И. Г.** Растровые дифракционно-апертурные очки // Автометрия. 1997. № 6. С. 57–66.
10. **Ленкова Г. А.** Особенности оптических поверхностей мультифокальных дифракционно-рефракционных хрусталиков глаза // Автометрия. 2017. **53**, № 5. С. 17–29.
11. **Ленкова Г. А.** Киноформы. Синтез фазовой структуры и допустимые погрешности. Новосибирск, 1979. 28 с. (Препр. /ИАиЭ СО АН СССР; 98).
12. **Ленкова Г. А.** Особенности распределения интенсивности в дифракционном спектре амплитудно-фазовых решеток // Автометрия. 1992. № 5. С. 14–26.
13. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
14. **Voskresenskaya A., Pozdeyeva N., Pashtaev N. et al.** Initial results of trifocal diffractive IOL implantation // Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol. 2010. **248**, N 9. S. 1299–1306.
15. **Yaish S. B., Zlotnik A., Raveh I. et al.** Intra-ocular omni-focal lens with increased tolerance to decentration and astigmatism // Journ. Refract. Surg. 2010. **26**, N 1. P. 71–76.

Поступила в редакцию 21 марта 2018 г.
