

УДК 617.741 : 535.4

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МУЛЬТИФОКАЛЬНЫХ ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫХ ХРУСТАЛИКОВ ГЛАЗА

Г. А. Ленкова

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

Рассмотрены особенности форм поверхностных структур мультифокальных искусственных хрусталиков глаза — интраокулярных линз (ИОЛ), которые в отличие от бифокальных ИОЛ формируют дополнительные фокусы или увеличивают глубину фокуса, что позволяет хорошо видеть не только вблизи и вдаль, но и на промежуточном расстоянии. Расширение области чёткого зрения достигается на основе явлений дифракции, интерференции и рефракции (изменении радиуса кривизны поверхности линзы). Приведены оптические характеристики наиболее известных мультифокальных ИОЛ (трифокальных, квадрофокальных и с расширенной фокальной областью).

Ключевые слова: дифракционно-рефракционный хрусталик глаза, мультифокальные, трифокальные и квадрофокальные интраокулярные линзы, расширение фокальной области.

DOI: 10.15372/AUT20170502

Введение. Большинство пациентов примерно после 40 лет начинают испытывать затруднения при чтении, так как хрусталики глаз постепенно теряют эластичность и снижается аккомодация (способность чётко видеть на разных расстояниях). С возрастом у многих развивается пресбиопия (дальнозоркость), появляется катаракта (помутнение хрусталика) и для восстановления хорошего зрения требуется замена естественного хрусталика искусственным, так называемой интраокулярной линзой (ИОЛ).

Первые ИОЛ были однофокусными и не позволяли пациентам видеть без очков на ближнем расстоянии, поскольку их изготавливали предпочтительно с фокусом, рассчитанным для дальнего зрения. Аккомодационная функция сохранялась в очень малой степени за счёт сокращения глазного яблока, дифракции на зрачке и сферических аберраций. В 80-х годах прошлого века стали разрабатывать бифокальные интраокулярные линзы, которые называют псевдоаккомодирующими, потому что они дают возможность пациенту сфокусироваться на ближних и дальних объектах [1, 2]. В зависимости от принципов, на основе которых функционируют ИОЛ, а именно на законах преломления, волновой оптики или тех и других вместе, их называют рефракционными, дифракционными или дифракционно-рефракционными (гибридными). Интраокулярные линзы с применением дифракции показывают лучшие оптические и клинические характеристики, чем их рефракционные аналоги [3].

Пациенты с бифокальными ИОЛ имеют хорошую остроту зрения вдаль и вблизи, но значительно сниженную на промежуточном расстоянии. Для решения этой проблемы были разработаны мультифокальные ИОЛ, позволяющие формировать дополнительные (промежуточные) фокусы. В принципе, любые линзы, которые обладают более чем одной оптической силой, могут быть названы мультифокальными, но для конкретизации к мультифокальным лучше относить линзы, имеющие больше двух сил.

Мультифокальные и бифокальные ИОЛ являются линзами «одновременного зрения». Это значит, что создаётся два или несколько изображений одного и того же объекта, из

которых одно чёткое, а остальные размытые, образующие фон или так называемое «гало». Интенсивность размытых изображений значительно меньше, чем сфокусированного. Например, соотношение сигнал/шум качественных бифокальных ИОЛ находится в диапазоне от 20 до 25 дБ, что по интенсивности соответствует превышению сигнала над шумом в 100–300 раз [3]. Звуковой сигнал в таком диапазоне трудно отделить от шума. Но это реализуется с помощью электронных аудиоусилителей с подходящим программно-аппаратным обеспечением. Аналогично при восприятии изображения роль усиливающей электронной системы выполняет мозг человека, помогающий отделить оптический сигнал, создаваемый одним фокусом, на фоне оптического шума от других фокусов.

В настоящее время существует много различных моделей мультифокальных ИОЛ (трифокальных, квадрофокальных и просто с расширенной фокальной областью). Результаты имплантации таких ИОЛ обычно подробно обсуждаются, но оптические конструкции ИОЛ, в частности формы профилей поверхностей, не всегда понятны, даже если есть ссылки на патент.

Цель данной работы — анализ особенностей поверхностных структур, применяемых в современных мультифокальных ИОЛ с более чем двумя оптическими силами; рассмотрение оптических характеристик наиболее известных мультифокальных ИОЛ с указанием фирм-изготовителей. Вопросы, не имеющие отношения к оптике и световым преобразованиям, а именно: технология изготовления, форма крепления линз (гаптика), результаты клинических испытаний и т. д. — не рассматриваются.

Общие характеристики оптических структур мультифокальных ИОЛ. Мультифокальные ИОЛ состоят из двух элементов: рефракционного (плосковыпуклая или двояковыпуклая линза) и дифракционного (фазовая микроструктура). Рефракционный базовый элемент преобразует свет по оптическим законам преломления и определяет главную оптическую силу, а дифракционный элемент, формируемый на одной из поверхностей линзы, — по законам дифракции и создаёт дополнительно один или несколько фокусов.

Следует отметить, что значительный хроматизм дифракционных компонентов не осложняет их применение в ИОЛ. Хроматические aberrации компенсируются благодаря удачному сочетанию низкой и высокой оптических сил дифракционного и рефракционного элементов с противоположной зависимостью фокусных расстояний от длины волны [4]. Сферические aberrации устраняются путём асферизации одной из поверхностей ИОЛ или введением aberrационного коэффициента в дифракционную структуру [5].

Дифракционная часть ИОЛ представляет собой пилообразную структуру, называемую также киноформной (рис. 1, *a*), которая подобна фазовой линзе Френеля, или бинарную (рис. 1, *b*), подобную фазовой зонной пластинке. Радиусы зон r_k киноформной и бинарной структур соответственно определяются соотношениями

$$r_k^2 = 2k\lambda/D_d; \quad r_k^2 = k\lambda/D_d, \quad (1)$$

где $k = 1, 2, \dots$ — номер зоны от центра структуры; $D_d = n_1/f$ (D_d и f — оптическая сила и фокусное расстояние дифракционного компонента, n_1 — показатель преломления окружающей среды); λ — длина волны в вакууме. Площадь S каждой из зон киноформной и бинарной структур соответственно равна площади S_1 центральной (первой) зоны:

$$S = S_1 = \pi r_1^2 = 2\pi\lambda/D_d; \quad S = S_1 = \pi r_1^2 = \pi\lambda/D_d, \quad (2)$$

где r_1 — радиус первой зоны. Ширина зон dr_k уменьшается от центра к периферии до нескольких десятков микрон. Например, для киноформной структуры из (1) следует, что $dr_k = r_k/2k$. При $D_d = 3$ дптр и $r_k = 3$ мм ($k = 25$) ширина dr_k составляет 60 мкм.

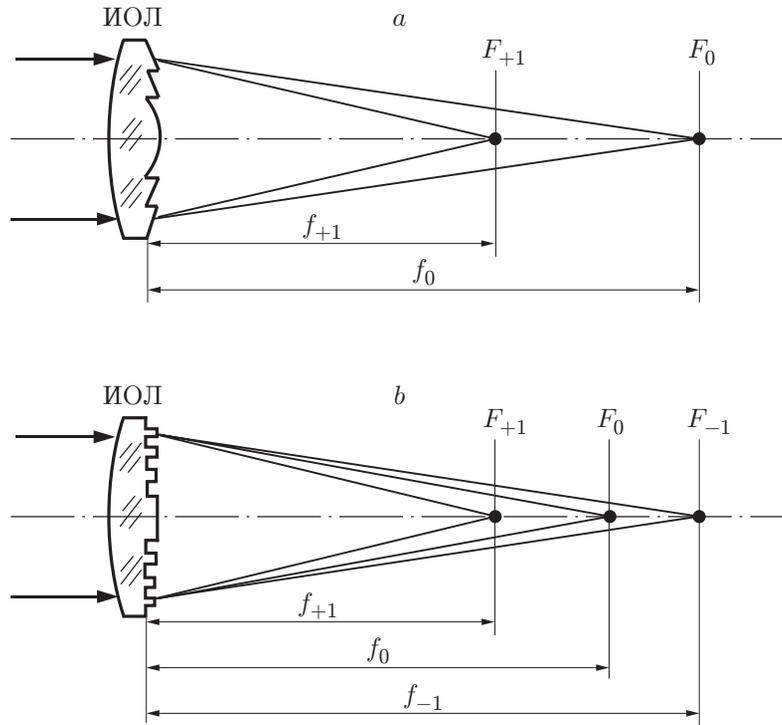


Рис. 1.

При компенсации сферических aberrаций с помощью дифракционного компонента, что имеет место в дифракционно-рефракционной линзе МИОЛ-Аккорд, зоны выполняются в соответствии с уравнением [5, 6]

$$(k + a_0)\lambda = a_1 r_k^2 - a_2 r_k^4, \quad (3)$$

где a_0 — коэффициент, характеризующий фазовый сдвиг и уменьшение радиуса центральной зоны; $a_1 = n_1/2f = D_d/2$; a_2 — aberrационный коэффициент. В хрусталике МИОЛ-Аккорд $a_0 = 0,24$, $a_1 = 0,002\,097 \text{ мм}^{-1}$ (соответствует $D_d = 4,2 \text{ дптр}$) и $a_2 = 0,000\,0543 \text{ мм}^{-3}$. Если $a_0 = 0$, $a_2 = 0$, то формула (3) переходит в формулу (1).

В табл. 1 и 2 приводятся значения f , r_1 , S_1 , $k_{1,5}$, $k_{2,25}$ и k_3 для бинарной и киноформной структур при $\lambda = 0,5461 \text{ мкм}$ и $n = 1,336$, рассчитанные по формулам (1), (2). Подстрочные индексы при k соответствуют значениям радиусов зон в миллиметрах. Эти данные позволяют легче ориентироваться при сравнении параметров анализируемых ИОЛ.

Высота структуры зависит от требуемых интенсивностей света в фокусах (порядках дифракции). Для бинарной структуры распределение интенсивностей можно представить в виде соотношений [7, 8]

$$I_0 = \cos^2(\varphi/2), \quad (4)$$

$$I_n = \frac{\sin^2(\pi n/2)}{(\pi n/2)^2} \cos^2[(\pi n - \varphi)/2], \quad (5)$$

$$I_{+1} = I_{-1} = (4/\pi^2) \sin^2(\varphi/2) = 0,405 \sin^2(\varphi/2). \quad (6)$$

Для пилообразной структуры аналогичные зависимости имеют следующий вид:

$$I_0 = [\sin(\varphi/2)/(\varphi/2)]^2, \quad (7)$$

Таблица 1

Бинарная структура ИОЛ

$D_d = n_1/f$, дптр	$f = n_1/D_d$, мм	$r_1 = \sqrt{\lambda}/D_d$, мм	$S_1 = \pi\lambda/D_d$, мм ²	$k = D_d r_k^2/\lambda$		
				$k_{1,5}$	$k_{2,25}$	k_3
1	1336	0,739	1,7156	4,1	9,3	16,5
2	668	0,5225	0,8578	8,2	18,5	33,0
3	445,3	0,4267	0,5719	12,4	27,8	49,4
4	334	0,3695	0,4289	16,5	37,1	65,9

Таблица 2

Киноформная структура

$D_d = n_1/f$, дптр	$f = n_1/D_d$, мм	$r_1 = \sqrt{2\lambda}/D_d$, мм	$S_1 = 2\pi\lambda/D_d$, мм ²	$k = D_d r_k^2/(2\lambda)$		
				$k_{1,5}$	$k_{2,25}$	k_3
1	1336	1,045	3,4312	2,1	4,6	8,2
2	668	0,739	1,7156	4,1	9,3	16,5
3	445,3	0,6034	1,1438	6,2	13,9	24,7
4	334	0,5225	0,8578	8,2	18,5	33,0

$$I_n = [\sin(\varphi/2)/(\pi n - \varphi/2)]^2, \quad (8)$$

$$I_{+1} = [\sin(\varphi/2)/(\pi - \varphi/2)]^2, \quad (9)$$

$$\varphi = 2\pi h(n_2 - n_1)/\lambda, \quad (10)$$

где I_0 , I_n , I_{+1} , I_{-1} — относительные интенсивности в 0-, n -, $+1$ - и -1 -м порядках (фокусах); n — порядок дифракции; φ и h — значения фазовой задержки (в радианах) и высоты профиля дифракционной структуры; n_2 — показатель преломления материала, из которого сделана линза. Распределение интенсивностей для бинарной структуры имеет симметричный характер относительно 0-го порядка, а для киноформной — асимметричный.

Исходя из заданных интенсивностей, можно определить фазовую задержку φ и затем на основании (10) необходимую высоту структуры по формуле

$$h = \varphi\lambda/2\pi(n_2 - n_1). \quad (11)$$

Например, для бинарной структуры, полагая $I_0 = I_{+1} = I_{-1}$, из (4) и (6) получаем $\operatorname{tg}(\varphi/2) = \pi/2 = 1,571$. Из соотношения (11) следует, что $\varphi = 0,638\pi$ (115°) и $h(n_2 - n_1) = 0,32\lambda$. При этих значениях h и φ наблюдаются три порядка с интенсивностями по 0,288 (28,8 %, в сумме 86,4 %) от света, проходящего через структуру. Остальной свет (13,6 %) уходит в более высокие порядки. Если $I_0 = 0$, то из (4) получаем $\varphi = \pi$ (180°) и $h(n_2 - n_1) = 0,5\lambda$. В этом случае будет два порядка с равными интенсивностями: $I_{+1} = I_{-1} = 0,405$ (40,5 %, в сумме 81 %), 19 % — нерабочие порядки. Для киноформной структуры на основании равенства $I_0 = I_{+1}$ из (7) и (9) значения h , φ и интенсивностей получаются такие же, как для бинарной структуры при $I_0 = 0$, но для 0-го и $+1$ -го порядков $I_0 = I_{+1} = 40,5$ %. Из (11) следует, что при $\varphi = \pi$, $\lambda = 0,5461$ мкм, $n_1 = 1,336$ и $n_2 = 1,505$ высота h равна 1,62 мкм. При $\varphi = 2\pi$ будет только один фокус: в бинарной структуре это — I_0 , а в киноформной — I_{+1} .

Таблица 3

Распределение интенсивностей по порядкам дифракции в киноформной структуре

h , мкм	Среда, $n_1 = 1,336$, $n_2 = 1,505$				Воздух, $n_1 = 1$, $n_2 = 1,505$			
	$\varphi/2$, рад	I_0	I_{+1}	I_{+2}	$\varphi/2$, рад	I_0	I_{+1}	I_{+2}
1,0	0,97	0,72	0,15	0,02	2,91	0,01	0,98	0,00
1,1	1,07	0,67	0,18	0,03	3,20	0,00	1,00	0,00
1,2	1,17	0,62	0,22	0,03	3,49	0,01	0,96	0,01
1,3	1,26	0,57	0,26	0,04	3,78	0,02	0,87	0,06
1,4	1,36	0,52	0,30	0,04	4,07	0,04	0,75	0,13
1,5	1,46	0,46	0,35	0,04	4,36	0,05	0,59	0,24
1,6	1,56	0,41	0,40	0,04	4,65	0,05	0,44	0,37
1,7	1,65	0,36	0,45	0,05	4,94	0,04	0,29	0,53
1,8	1,75	0,32	0,50	0,05	5,23	0,03	0,17	0,68
1,9	1,85	0,27	0,55	0,05	5,52	0,02	0,08	0,82
2,0	1,94	0,23	0,60	0,05	5,81	0,01	0,03	0,93

В табл. 3 приводятся значения интенсивностей для киноформных структур с разными высотами. Видно, что в воздухе и в среде интенсивности разные. Это необходимо учитывать при исследованиях ИОЛ. Например, если $h = 1,6$ мкм, то в среде $I_0 \simeq I_{+1}$, а в воздухе $I_{+1} \simeq I_{+2}$ и $I_0 \simeq 5\%$ (значения интенсивностей выделены жирным шрифтом). Отклонение высоты на 0,1 мкм приводит к изменению интенсивностей 0-го и +1-го порядков на $\pm 5\%$, а их взаимной разницы — на 10 %.

Вышеуказанный ориентировочный расчёт ширины и высоты зон показывает, что точное выполнение вершин и скатов структуры может представлять проблему при изготовлении ИОЛ методом алмазного точения. Этот метод наиболее распространён в производстве мультифокальных ИОЛ, но имеет ограничения из-за радиуса заточки резца. Более совершенный метод изготовления ИОЛ применяется в Институте автоматики и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск) [6, 9]. Он основан на записи структуры зон лазерным лучом в фоторезисте с последующим травлением профиля поверхности в кварцевой матрице. Далее матрица используется для формирования линз МИОЛ-Аккорд методом фотополимеризации, разработанным фирмой НПП «Репер-НН» (г. Нижний Новгород). В 2013 г. американская компания Aaren Scientific Inc. заявила ещё об одной технологии — о возможности фрезеровать индивидуальные ИОЛ с помощью фемтосекундного лазера [10], но о мультифокальных ИОЛ с дифракционной структурой не упоминается.

Оптические структуры дифракционных элементов ИОЛ. На рис. 2 показаны наиболее характерные формы фазовых профилей мультифокальных ИОЛ: 1 — бинарный, 2 — двойной киноформный, 3 — киноформный, 4 — киноформный с удвоенной частотой зон, 5 — с наложением профилей, 6 — с чередованием профилей, 7 — комбинированный, 8 — эшелонный, 9 — с постоянной шириной зон, 10 — квадрофокальный вырожденный, действует как трифокальный.

Как было отмечено выше, бинарный профиль (см. рис. 1, *b* и рис. 2, 1) в отличие от киноформного (см. рис. 1, *a*) позволяет разделить световой пучок на три пучка, только задавая высоту профиля. Но недостаток такой структуры в том, что по сравнению с +1-м фокусом в отрицательном фокусе (−1-м порядке) хроматические аберрации не компенсируются, а увеличиваются [4]. Это также присуще структуре с профилем, который представляет два киноформных профиля с противоположной оптической силой (см. рис. 2, 2) и формирует три порядка (0-, +1- и −1-й). К профилю 2 приближается синусоидальный профиль, который предлагается, например, в [11] для мультифокальных ИОЛ. Синусоидальная форма характеризуется низкими потерями интенсивности, но так же, как преды-

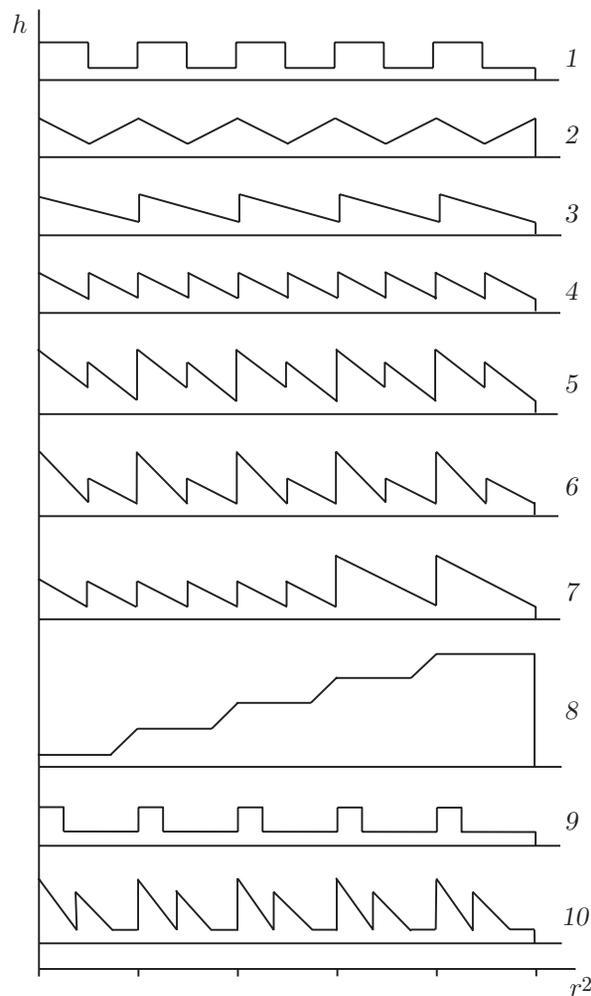


Рис. 2.

дущие две (1 и 2 на рис. 2), не компенсирует хроматические aberrации в -1 -м порядке. Возможно, из-за хроматических aberrаций подобные структуры не нашли широкого распространения.

Киноформный профиль позволяет формировать только два интенсивных порядка дифракции, поэтому для получения трифокальных ИОЛ комбинируют два профиля (3 и 4 на рис. 2) путём их наложения [12] или чередования [13, 14], как показано соответственно на рис. 2 (5 и 6). При наложении профиль 3 с более низкой частотой зон создаёт дополнительный, промежуточный фокус, а профиль 4 с удвоенной частотой — дальний и ближний фокусы. Частота чередуемых зон в профиле 6 на рис. 2 одинаковая, но высота — разная. Высоты профилей подбираются в зависимости от требуемого соотношения интенсивностей в фокусах и их взаимного расположения. В некоторых конструкциях ИОЛ вводится также аподизация, заключающаяся в том, что высота профиля изменяется в пределах диаметра линзы или уменьшается к периферии [12]. Распределение интенсивности варьируется или увеличивается в дальнем фокусе по сравнению с ближним.

Из-за проблем алмазного точения краевые зоны в некоторых конструкциях ИОЛ объединяются. При этом увеличиваются ширина и высота зон. Например, в центральной части структуры формируют бифокальный профиль (с фазовой задержкой $\lambda/2$), а в краевой — монофокальный (с фазовой задержкой в несколько длин волн) (см. рис. 2, 7) или комбинируют трифокальные (в центре) и бифокальные (на периферии) профили. Расширение зон облегчает их изготовление, но при этом ослабляется дифракционная составляющая

в распределении интенсивности в порядках дифракции и возникает зависимость распределения от децентрации.

Чтобы избавиться от резких поверхностных изменений структуры (крутых скатов, острых вершин), в [15] предлагается изменять рельеф поверхности линзы, наращивая его на высоту, соответствующую фазовой задержке $\lambda/2$ или λ (см. 8 на рис. 2). Это похоже на сочетание рефракционной поверхности с эшелонной структурой Майкельсона, представляющей собой ступенчатую дифракционную решётку [16], хотя такое название в [15] не употребляется. В сравнении с [15] в формировании поверхностей обычных мультифокальных рефракционных линз при изменении радиусов кривизны фаза не учитывается. В результате в фокусе интерферируют пучки со случайными фазами и наблюдаются колебания интенсивности. Возможно, поэтому на практике отказываются от применения этих линз. Предлагаемую в [15] мультифокальную ИОЛ, скорее, можно назвать сфазированной рефракционной, но не дифракционной.

В некоторых ИОЛ сочетаются дифракционные и рефракционные способы расширения фокальной области. Например, выполняют центральную часть ИОЛ в виде асферической поверхности, среднюю — дифракционной, крайнюю — монофокальной [17, 18]. Структуры некоторых промышленных мультифокальных ИОЛ подробно не рассматриваются, приводятся только результаты измерений оптических характеристик и клинических испытаний.

Иногда увеличивают глубину фокуса за счёт уменьшения оптической силы дифракционного компонента [19] или используют оптические фазовые элементы, выполняющие в ИОЛ роль только расширителя фокальной области, присущей рефракционной части. Также известно применение кольцевых решёток без оптической силы. В сечении решётки могут иметь вид 1, изображённый на рис. 2, но с линейной, а не квадратичной зависимостью от радиуса зоны. Это значит, что расстояние между зонами постоянное, как в дифракционном аксиконе.

На основе кольцевых решёток разработана новая технология фазовых элементов — EDOF (Extended Depth of Focus) [20–22]. В [20] предлагается оптический элемент EDOF низкой частоты (пять зон), обеспечивающий непрерывную фокусировку от 35 см до бесконечности, а также повышенную толерантность к децентрации линзы. Элемент гравировается на поверхности линзы и представляет серию мелких концентрических канавок глубиной менее 1 мкм, соответствующей приблизительно фазовой задержке в одну длину волны для воздуха. Подобные элементы смещают фазу проходящего излучения, но не вызывают разделения на порядки дифракции. В результате интерференции волн от соседних зон возникает эффект канала, благодаря которому получается чёткое изображение объектов, удалённых на разные расстояния. Глубина фокуса равна приблизительно 1 мм (соответствует 3 дптр для глаза). Элемент нечувствителен к длине волны и обеспечивает высокую энергетическую эффективность. Кроме того, применяется сглаживание структуры, что значительно уменьшает артефакты типа ореола. На основе EDOF сделаны очки, которые выпускает фирма Xseed Imaging (Израиль). Считается, что идея подходит и для интраокулярных линз [21, 22]. Элемент EDOF для очков представляет собой фазовую решётку из 25 зон со скважностью приблизительно $1/3$ – $1/4$ (см. 9 на рис. 2, но в зависимости от r) [22].

Особенности квадрофокального профиля (см. 10 на рис. 2) будут объяснены далее при рассмотрении характеристик мультифокальных ИОЛ. На рис. 2 показаны только формы профилей, а значения высот дифракционных структур зависят от конструкции и модели ИОЛ, но не всегда приводятся в описаниях. Связь между высотой и значениями интенсивностей в фокусах можно определить по формулам (4)–(11).

Фирмы, изготавливающие мультифокальные дифракционно-рефракционные ИОЛ, имеют большой опыт в производстве ИОЛ и ранее производили бифокальные ИОЛ. В последующие годы, учитывая пожелания пациентов и офтальмологов, они заня-

лись разработкой мультифокальных ИОЛ, а именно трифокальных, квадрофокальных и ИОЛ с расширенной глубиной фокуса.

Часть фирм работает как самостоятельные: НПП «Репер-НН» (г. Нижний Новгород, Россия), выпускающее линзы MIOL-Record; Physiol (Национальный парк Льеж, Бельгия, основана в 1986 г.) — линзы FineVision; VSY Biotechnology (г. Амстердам, Нидерланды) — линзы Acviva Reviol Tri-ED. Другие фирмы входят в состав корпораций, тем не менее сохраняя первоначальный бренд для своей продукции. Среди них: Aaren Scientific (г. Онтарио, Калифорния, США, основана в 1989 г., с 2014 г. входит в состав Carl Zeiss Meditec, г. Йена, Германия) — линза OptiVis; Acri. Tec GmbH (г. Хеннингсдорф, Германия, основана в 1998 г., с 2010 г. входит в состав Carl Zeiss Meditec AG, г. Йена, Германия) — линза AT LISA tri 839 MP; Alcon Surgical Inc. (г. Форт-Уорт, Техас, США, основана в 1945 г., с 2010 г. входит в состав второй по величине в мире фармацевтической корпорации Novartis, г. Базель, Швейцария) — линза AcrySof[®] IQ PanOptix Model TFNT00 и AMO (Abbott Medical Optics, г. Санта Ана, Калифорния, США, основана в 1976 г. как American Medical Optics, с 1986 г. — Allergan Medical Optics, с 2002 г. — Advanced Medical Optics, с 2009 г. — Abbott Medical Optics, с 2017 г. входит в состав отделения Vision первой по величине в мире корпорации Johnson & Johnson, г. Нью-Брансуик, Нью-Джерси, США) — линза TECNIS[®] Symphony Model ZXR00.

В названиях некоторых фирм зашифрованы фамилии основателей, а в названиях линз — их свойства. Так, например, MIOL — мультифокальная ИОЛ; FineVision: F — fine (вдаль), i — intermediat (промежуточный), ne — near (вблизи), Vision — зрение; LISA: L — Light (асимметричное распределение света), I — Independency (независимость от размера зрачка), S — SMP (Smooth Micro Phase, т. е. технология сглаженной дифракционной структуры), A — Aberration (коррекция аберраций за счет асферической оптики), ED — Extended Depth (расширенная глубина фокуса).

Характеристики мультифокальных дифракционно-рефракционных ИОЛ. Появление мультифокальных конструкций ИОЛ относится к 2007–2015 гг. В табл. 4 приведён список основных мультифокальных ИОЛ (в скобках указаны годы первой публикации) и те из характеристик ИОЛ, которые отражены в литературе.

Большинство ИОЛ — это акриловые гидрофобные и гидрофильные линзы, но у производителей и офтальмологов нет единого мнения о преимуществе тех или других [23]. Все ИОЛ, кроме MIOL-Record, имеют двояко-выпуклую форму. Для компенсации сферических аберраций глаза во многих ИОЛ одна из поверхностей асферическая. Последнее не совсем понятно, так как сферические аберрации тоже расширяют глубину фокуса.

Распределение интенсивности по порядкам дифракции (фокусам) даётся иногда по отношению к полной интенсивности светового потока (см. табл. 4, MIOL-Record), проходящего через ИОЛ, но чаще — по отношению к суммарной интенсивности основных порядков. Потери, как правило, относятся к полной интенсивности. Для линзы OptiVis интенсивность в дальнем и ближнем фокусах приводится как взаимное соотношение, а в промежуточном — в процентах к полной интенсивности. Для линзы TECNIS[®] Symphony известно только значение потери света. Дополнительная оптическая сила может характеризовать ИОЛ отдельно или вместе с глазом. Такое разночтение затрудняет иногда сравнение характеристик ИОЛ. Например, +3,0 или +4,0 дптр дополнительной аккомодации эквивалентны приблизительно +2,25 или +3,0 дптр очковой коррекции.

Основная часть мультифокальных ИОЛ, представленных в табл. 4, конструируется только по дифракционному принципу. В линзах MIOL-Record и OptiVis применяется комбинирование рефракционных и дифракционных структур, а в AT LISA tri 839 MP — оригинальная сфазированная рефракционная структура. В таблицу не включены ИОЛ, в которых глубина фокуса расширяется путём применения особого метода EDOF (см. 9 на рис. 2).

Таблица 4

Характеристики основных мультифокальных ИОЛ

Название ИОЛ, характеристики	d_1 , S_1 , r_1 , n_2 , h	Соотношение интенсивностей вдаль/вблизи/среднее, потери	Структура, форма поверхности
1. MIOL-Record (2007–2010 гг.), гидрофобная, $-2, 0$, $+2$ дптр (очковая коррекция)	$d_1 = 0,860$ мм, ($S_1 = 0,58$ мм ²), $n_2 = 1,55$, $h = 1,1$ мкм	28/28/28 %, 16 % ($d = 3,4$ мм)	$d = 0-3,4$ мм — трифокальная, $d = 3,4-6$ мм — монофокальная
2. FineVision (2010 г.), гидрофильная, гидрофобная, $+1,75$, $+3,50$ дптр	$n_2 = 1,46$, $n_2 = 1,52$, 23 зоны	49/34/17 %, 15 % ($d = 3$ мм), 67/24/9 %, 15 % ($d = 4,5$ мм)	трифокальная, апоидизация, асферика ($-0,11$), слабое гало
3. OptiVis (2011 г.), расширенная глубина фокуса	$S_1 = 2,1$ мм ² ($r_1 = 0,81$ мм)	41/59/16 %, 4 % ($d = 3$ мм)	$d = 0-1,5$ мм — рефракционная прогрессивная, $d = 1,5-3,8$ мм — бифокальная, апоидизация, $d = 3,8-6$ мм — рефракционная, асферика ($-$)
4. AT LISA tri 839 MP (2012 г.), гидрофильная с гидрофобным покрытием, $+1,66$ (80), $+3,33$ (40 см) дптр	$S_1 = 1,3$ мм ² ($r_1 = 0,64$ мм)	50/30/20 %, 14,3 % ($d = 4,34$ мм)	$d = 0-4,34$ мм — трифокальная эшелонная, $d = 4,34-6$ мм — бифокальная, асферика ($-0,18$ мкм), заметное гало
5. Activa Reviol Tri-ED (2015 г.), гидрофильная, $+1,5$, $+3$ дптр, расширенная глубина фокуса	25 зон	44/28/28 %, 10,9 % ($d = 6$ мм), малая зависимость от диаметра	трифокальная, «активная» дифракционная оптика, асферика на передней поверхности
6. AcrySof® IQ PanOptix, Model TFNT00 (2015 г.), гидрофобная, $+2,17$ (60), $+3,25$ (42 см) дптр	15 зон ($d = 4,5$ мм)	50/25/25 %, 12 % ($d = 4,5$ мм)	$d = 0-4,5$ мм — квадрофокальная (трифокальная), $d = 4,5-6$ мм — монофокальная
7. TECNIS® Symfony, Model ZXR00 (2015 г.), гидрофобная, $+1,75$ дптр	$S_1 = 1,3$ мм ² ($r_1 = 0,64$ мм), $n_2 = 1,47$, 9 зон	14,3 % — потери	$d < 3$ мм — расширение глубины фокуса на 1,0 дптр, $d > 3$ мм — бифокальная, асферика ($-0,27$)

Примечания: d_1 и d — диаметры центральной зоны и структуры; в скобках значения, рассчитанные по формулам (2). В первом столбце в скобках после значений оптической силы в диоптриях даётся расстояние от глаза до предмета в сантиметрах.

1. Линза MIOL-Record [24, 25] плоско-выпуклая, на плоской поверхности сформирована бинарная структура (см. рис. 2, 1), разделяющая световой поток на три части.

2. Линза FineVision [12, 26] имеет на одной из поверхностей комбинацию двух профилей, подобную изображённой на рис. 2, 5, но с аподизацией. При расширении зрачка увеличивается интенсивность дальнего фокуса за счёт уменьшения высоты структуры в направлении к периферии.

3. Линза OptiVis [17, 27, 28] отличается сложным рельефом одной из поверхностей. Центральная часть рефракционная прогрессивная, радиус кривизны изменяется так, чтобы формировалась расширенная фокальная область от основной (дальней) до промежуточной оптической силы. Средняя часть дифракционная бифокальная (дальний и ближний фокусы) (см. 3 на рис. 2), периферия — асферическая поверхность с основной оптической силой.

4. Линза AT LISA tri 839 MP [15, 29] с оригинальной структурой на поверхности, ответственной за расширение фокальной области. Центральная часть структуры трифокальная, далее — бифокальная. Каждая зона состоит из основных (принципиальных) и фазовых подзон (см. 8 на рис. 2). Последние вносят фазовый сдвиг при переходе между основными подзонами. В каждой зоне бифокальной структуры имеется по одной основной и фазовой подзоне, как на рис. 2, 8, а в трифокальной — их по две. Как было отмечено выше, эту структуру можно назвать сфазированной рефракционной, но не дифракционной. Структура характеризуется сглаженным профилем и отсутствием хроматических аберраций.

5. Линза Acryva Reviol Tri-ED позиционируется как ИОЛ с расширенным фокусом (в названии ED). Структура дифракционного элемента называется «активной» дифракционной, но нет конкретных описаний её формы. Известно только, что линза сконструирована на базе бифокальной Acryva Reviol (см. 3 на рис. 2) и имеет сглаженный рельеф. Возможно, что это структура с наложением (см. 5 на рис. 2) или чередованием (см. 6 на рис. 2) дифракционных структур с разной высотой или частотой [14]. Из рекламной информации следует, что линза Acryva Reviol Tri-ED имеет лёгкую отрицательную асферичность, помогающую пациентам лучше поддерживать глубину фокуса [30]. Из графиков распределения интенсивности видно, что есть некоторая аподизация. От центра линзы до радиуса 1,5 мм интенсивность дальнего фокуса увеличивается, а ближнего — уменьшается, что соответствует понижению высоты профиля структуры. Достигнутое соотношение дальнего и ближнего фокусов почти не изменяется до радиуса 2,25 мм, а затем выходит на уровень, приведённый в табл. 4. Распределение интенсивности называют оптимизированным. Изменения интенсивностей в пределах апертуры линзы и потери их значительно меньше, чем в других линзах.

6. Линза AcrySof® IQ PanOptix действует как трифокальная. По существу дифракционный элемент этой ИОЛ имеет квадрофокальную структуру с двумя промежуточными фокусами (дальний фокус — ∞ , промежуточные — 120 и 60, ближний — 40 см, возможно, это 0-, +1-, +2- и +3-й порядки дифракции) [31, 32], но модифицированную таким образом, чтобы первый промежуточный фокус перенаправлялся в дальний для усиления эффективности последнего. На месте зон для фокуса 120 см поверхность элемента совпадает с базовой поверхностью линзы (см. 10 на рис. 2), в результате фактически остаются три фокуса. Считается, что расстояние 60 см важно в повседневной жизни (компьютер, телевизор). Дифракционная структура не аподизирована, на периферии имеет монофокальную форму. Фирма называет свою инновационную технологию ENLIGHTEN (ENhanced LIGHT ENergy — усиленная световая энергия) [33]. В отличие от PanOptix™ в других трифокальных ИОЛ ближний фокус расположен обычно на расстоянии порядка 40 см, а дополнительный, промежуточный — 80 см от глаза.

7. Линза TECNIS® Symphony — линза, о форме дифракционной структуры которой известно очень мало. Измерения показывают, что наблюдается расширение глубины фокуса на 1 дптр по сравнению с монофокальной ИОЛ [34]. Её называют линзой с расширенным фокусом — EDOF. В [35] сообщается, что, хотя по структуре эта линза подобна мультифокальной ИОЛ, по сути она не является таковой. Линза имеет единую удлинённую фокальную зону, а не два отдельных фокуса. Результаты исследований, опубликованных в [36], показывают, что при диаметрах зрачка 3 и 3,75 мм линза проявляет себя как бифокальная дифракционная с дополнительной оптической силой +1,75 дптр и только при диаметре 2 мм — как линза с расширенной глубиной фокуса. Последнее можно объяснить тем, что функции рассеяния точки в фокусах расширяются и налагаются, получается удлинённая фокальная область. При диаметре 2 мм подобная картина наблюдается также для трифокальной линзы FineVision, имеющей дополнительные силы +1,75 и +3,5 дптр. Но фокус +3,5 дптр расположен отдельно, так как он существенно ближе к линзе и функция рассеяния точки уже.

Конструктивные особенности ИОЛ, связанные с внешним видом, формой гаптика и материалом ИОЛ, методы изготовления и клинические испытания не являлись целью данной работы и подробно рассматриваются в [37], где также опубликованы исследования оптических характеристик бифокальной дифракционно-рефракционной линзы МИОЛ-Аккорд, проведённых в Институте автоматики и электрометрии СО РАН.

Заключение. После имплантации бифокальных ИОЛ пациенты имеют хорошую остроту зрения вдаль и вблизи, но сниженную на промежуточном расстоянии. Для устранения этого недостатка разработаны мультифокальные ИОЛ с различными формами профилей оптической поверхности.

На основе патентов и результатов исследований проведён анализ особенностей структур оптических поверхностей современных мультифокальных ИОЛ с более чем двумя оптическими силами. Показано, что мультифокальность ИОЛ в виде отдельных фокусов достигается несколькими способами: дифракционными (бифокальная, трифокальная и квадрофокальная структура), рефракционными прогрессивными (с изменением кривизны базовой поверхности линзы) и эшелонными (со ступенчатым изменением базовой поверхности линзы). Расширение фокальной области получают путём уменьшения дополнительной оптической силы дифракционного компонента (при малых диаметрах зрачка приводит к наложению функций рассеяния точки в 0-м и +1-м фокусах) и применения фазовых бинарных структур без оптической силы (подобных дифракционному аксикону), формирующих фокальную область в виде канала.

Рассмотрены основные известные виды мультифокальных ИОЛ с указанием фирм-изготовителей. Для облегчения процесса изготовления крайние зоны структур иногда объединяют (при этом периферия по действию может стать монофокальной) или комбинируют трифокальные (в центре) и бинарные (на периферии) дифракционные структуры. В некоторых ИОЛ применяются рефракционные прогрессивные структуры в сочетании с дифракционными. Линзы с необычными, оригинальными структурами, подобными дифракционному аксикону и эшелону Майкельсона, характеризуются независимостью от длины волны. Каждая фирма заявляет о преимуществах своих моделей мультифокальных ИОЛ. Насколько важны те или иные свойства линз зависит от потребностей и возможностей пациентов. Усложнение конструкций ИОЛ повышает стоимость изделия. Тем не менее интерес к трифокальным и другим мультифокальным ИОЛ с расширенной фокальной областью сохраняется, так как они создают более комфортные условия для зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Freeman M. H., Stone J.** A new diffractive bifocal contact lens // Journ. Br. Contact Lens Assoc. 1987. 10. P. 15–22.

2. **Cohen A. L.** Bifocal contact lens optics // *Spectrum*. 1989. N 6. P. 43–52.
3. **Fiala W.** Bi- and multifocal intraocular lenses // *Journ. Emmetropia*. 2010. **1**, N 1. P. 36–45.
4. **Ленкова Г. А.** Хроматические aberrации модели глаза с дифракционно-рефракционными интраокулярными линзами // *Автометрия*. 2009. **45**, № 2. С. 99–114.
5. **Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Исаков И. А. и др.** Бифокальная дифракционно-рефракционная интраокулярная линза // *Автометрия*. 1997. № 6. С. 26–41.
6. **Ленкова Г. А., Корольков В. П., Коронкевич В. П. и др.** Дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы // *Автометрия*. 2008. **44**, № 4. С. 75–88.
7. **Ленкова Г. А.** Влияние глубины фазового профиля на распределение интенсивности в порядках дифракции бифокального элемента // *Автометрия*. 1995. № 5. С. 16–24.
8. **Ленкова Г. А.** Особенности измерения оптической силы искусственных рефракционных и дифракционно-рефракционных хрусталиков глаза // *Оптика и спектроскопия*. 2016. **121**, № 2. С. 335–347.
9. **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.
10. **Pat. 20160074967 US.** Intraocular lens (IOL) fabrication system and method /R. Sahler, J. F. Bille. Заявка 17.03.2016. Приоритет 30.10.2015.
11. **Pat. 6923539 B2 US.** Aspheric lenses /M. J. Simpson, D. R. Carson. Заявка 02.08.2005. Приоритет 12.05.2003.
12. **Pat. 8636796 B2 US.** Intraocular lens /Y. Houbrechts, C. Pagnouille, D. Gatinel. Заявка 28.01.2014. Приоритет 26.01.2010.
13. **Pat. 9320594 B2 US.** Diffractive trifocal lens /J. T. Schwiegerling. Заявка 26.04.2016. Приоритет 12.02.2009.
14. **Pat. 8678583 B2 US.** Trifocal IOL using diffraction /A. L. Cohen. Заявка 25.03.2014. Приоритет 9.05.2012.
15. **Pat. 9223148 B2 US.** Multifocal lens /W. Fiala, M. Gerlach. Заявка 29.12.2015. Приоритет 27.04.2010.
16. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. Пер. англ. М.: Наука, 1973. 719 с.
17. **Pat. 7073906 US.** Aspherical diffractive ophthalmic lens /V. Portney. Заявка 11.06.2006. Приоритет 12.05.2005.
18. **Pat. 8619362 B2 US.** Multifocal diffractive ophthalmic lens with multifocal base surface /V. Portney. Заявка 31.12.2013. Приоритет 01.08.2006.
19. **Pat. 8747466 US.** Intraocular lens having extended depth of focus /H. A. Weeber, P. Piers. Заявка 10.06.2014. Приоритет 27.08.2007.
20. **Pat. 7061693 B2 US.** Method and system for extended depth of focus /Z. Zalevsky. Заявка 13.06.2006. Приоритет 16.08.2004.
21. **Zlotnik A., Raveh I., Yaish S. et al.** Extended depth of focus intra-ocular lens: a solution for presbyopia and astigmatism // *Proc. SPIE*. 2010. **7550**. 75500A.
22. **Попов Л.** Израильтяне выправили зрение всефокусными очками // *Membrana. Люди. Идеи. Технологии*. 8.10.2010. URL: <http://www.membrana.ru/particle/1147> (дата обращения: 15.05.2017).
23. **Barret G., Guo H., Malyugin B., Rojanapongpun P.** Материалы для изготовления интраокулярных линз // *Новое в офтальмологии*. 2010. **1**. С. 36–46.
24. **Pat. 5344447 US.** Diffractive trifocal intraocular lens design /G. J. Swanson. Заявка 06.09.1994. Приоритет 12.11.1992.

25. **Voskresenskaya A., Pozdeyeva N., Pashtaeв N. et al.** Initial results of trifocal diffractive IOL implantation // Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol. 2010. **248**, N 9. P. 1299–1306.
26. **Gatinel D., Pagnouille Ch., Houbrechts Y., Gobin L.** Design and qualification of a diffractive trifocal optical profile for intraocular lenses // Journ. Cataract Refract. Surg. 2011. **37**, N 11. P. 2060–2067.
27. **Portney V.** Light distribution in diffractive multifocal optics and its optimization // Journ. Cataract Refract. Surg. 2011. **37**, N 11. P. 2053–2059.
28. **Pat. 8894706 B2 US.** Non-prolate bi-sign aspheric intraocular lens /V. Portney. Заявка 25.11.2014. Приоритет 11.03.2009.
29. **Pat. 6536899 B1 US.** Multifocal lens exhibiting diffractive and refractive powers /W. Fiala. Заявка 25.03.2003. Приоритет 14.07.1999.
30. **Stodulka P.** Extended depth of focus in a trifocal IOL // CRST Europe. Innovations. 2015. URL: <https://crstodayeurope.com/articles/2015-jan/extended-depth-of-focus-in-a-trifocal-iol/> (дата обращения: 15.05.2017).
31. **Pat. 9335564 B2 US.** Multifocal diffractive ophthalmic lens using suppressed diffractive order /M.-T. Choi, X. Hong, Y. Liu. Заявка 10.05.2016. Приоритет 15.05.2014.
32. **Kohnen T.** First implantation of a diffractive quadrafocal (trifocal) intraocular lens // Journ. Cataract Refract. Surg. 2015. **41**, N 10. P. 2330–2332.
33. **PanOptix™ Enlightening Conversation.** Highlights from the Prague 2016 Alcon Multifocal IOL User Meeting. URL: <https://theophthalmologist.com/fileadmin/top/.../Alcon.pdf> (дата обращения: 15.05.2017).
34. **Weeber H. A., Meijer S. T., Piers P. A.** Extending the range of vision using diffractive intraocular lens technology // Journ. Cataract Refract. Surg. 2015. **41**, N 12. P. 2746–2754.
35. **Steven J. D.** Extended depth-of-focus IOLs // Cataract Refract. Surg. Today. 2015. URL: <https://crstoday.com/articles/2015-jan/extended-depth-of-focus-iols/> (дата обращения: 15.05.2017).
36. **Gatinel D., Loicq J.** Clinically relevant optical properties of bifocal, trifocal, and extended depth of focus intraocular lenses // Journ. Refract. Surg. 2016. **32**, N 4. P. 273–281.
37. **Искаков И. А., Тахчиди Х. П.** Интраокулярная коррекция дифракционно-рефракционными линзами. М.: Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2016. 240 с.

Поступила в редакцию 15 мая 2017 г.
