

К ИСТОРИИ ВОПРОСА О ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫХ ЛИНЗАХ

Дифракционно-рефракционные (ДР) интраокулярные линзы (ИОЛ) стали применяться в практической офтальмологии с конца 80-х—начала 90-х годов прошлого столетия. В отличие от рефракционных ИОЛ, используемых на протяжении уже более полувека, в офтальмологической среде до сих пор не сложилась единая терминология в отношении линз дифракционного типа. Существуют разногласия в отношении исторических приоритетов развития отдельных разделов дифракционной оптики, некоторых аспектов ее теории и трактовки практического использования ДР линз. Отчасти это связано с тем, что производство данной офтальмологической продукции является предметом ноу-хау компаний-производителей, в связи с чем получение достоверной информации в полном объеме затруднено.

Вместе с тем дифракционная оптика уже давно и успешно применяется во многих отраслях, таких как оптоэлектроника, производство аудио- и видеотехники и многих других. Здесь исторически сложилась своя устоявшаяся терминология в отношении теории, технологий производства и практического использования дифракционных элементов. ДР ИОЛ являются лишь частным случаем использования оптических систем, преобразующих свет на основе дифракции. Поэтому их следует рассматривать с позиций уже имеющихся знаний, накопленных в смежных специальностях. Кроме того, знание основных оптических принципов работы дифракционных элементов, используемых в известных конструкциях ИОЛ, облегчает понимание и интерпретацию клинических результатов при практическом использовании таких ИОЛ.

1.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КРУГОВЫХ ЗОННЫХ ПЛАСТИНОК

Дифракционная оптика неразрывно связана с именем великого французского ученого Огюстена Френеля (1788—1827). Академик Г.С. Ландсберг в очерке о жизни и деятельности О. Френеля [96] писал: «В течение 1815 г. два первых мемуара Френеля по дифракции света

были направлены в Академию наук. Затем, на протяжении примерно 10 лет, открытия Френеля следуют одно за другим. Когда к концу этого десятилетия деятельность Френеля из-за болезни и смерти прекратилась, — оптика была преобразована!».

«Преобразование оптики» Френелем заключалось в том, что благодаря его работам в начале XIX в. стала складываться система волновой оптики. Френель фактически положил начало целому периоду развития волновых представлений, пришедших на смену корпускулярным воззрениям на природу света.



Рис. 1.1. Огюстен Жан Френель

Заслуга Френеля состояла в том, что он уточнил принцип Гюйгенса о направлении распространения волнового фронта и дополнил его принципом интерференции.

Принцип Гюйгенса в его первоначальном виде позволял находить только положения волновых фронтов в последующие моменты времени, т.е. определять направление распространения волны. По существу, это был принцип геометрической оптики. Гипотезу Гюйгенса об огибающей вторичных волн Френель заменил физически ясным положением, согласно которому вторичные волны, приходя в точку наблюдения, интерферируют друг с другом.

Принцип Гюйгенса—Френеля об интерференции вторичных волн также представлял собой определенную гипотезу, но последующий опыт подтвердил ее справедливость. Для решения задачи о прямом линейном распространении света Френель предложил чрезвычайно наглядный прием, получивший название метода *зон Френеля*.

Вычисление результата интерференции вторичных волн в точке B (рис. 1.2) очень упрощается, если как предложил Френель, разбить поверхность фронта волны S , идущей из точки A , на зоны такого размера, чтобы расстояния от краев зоны до точки B отличались на $\lambda/2$, т.е.:

$$M \times B - M_0 B = M_2 B - M \times B = M_3 B - M_2 B = \dots = \lambda/2.$$

Эти зоны впоследствии получили название *зон Френеля*.

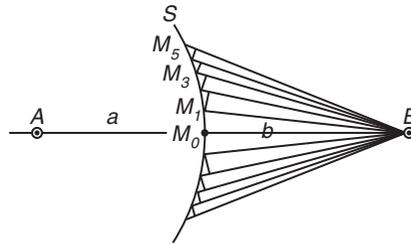


Рис. 1.2. Построение зон Френеля

Если смотреть на волновую поверхность из точки B , то границы зон Френеля будут представлять собой концентрические окружности. Их радиусы подчиняются установленному Ньютоном правилу расположения интерференционных колец [41]:

$$r_n = \sqrt{n} \cdot r_0, \quad (1.1)$$

т.е. радиусы зон относятся как корни квадратные из целых чисел¹.

Дальнейшие вычисления площадей полученных таким образом зон легко выполнимы, весьма наглядно представлены в [41] и равны:

$$S = \pi \frac{ab}{a+b} \lambda. \quad (1.2)$$

Одинаковые по площади зоны должны были бы возбуждать в точке наблюдения колебания с одинаковой амплитудой. Однако у каждой последующей зоны угол между лучом, проведенным в точку наблюдения, и нормалью к волновой поверхности возрастает. Френель высказал предположение (подтвержденное экспериментом), что с увеличением этого угла амплитуда колебаний уменьшается, хотя и незначительно.

Так как расстояния от двух соседних зон до точки наблюдения отличаются на $\lambda/2$, возбуждаемые этими зонами колебания находятся в противофазе. Поэтому волны от любых двух соседних зон с учетом допущения Френеля почти гасят друг друга. Такие оптические особенности объясняются волновыми свойствами света. Световая волна характеризуется длиной (путь, пройденный за полный цикл колебаний) и высотой колебаний (амплитуда). Когда разные волны приходят в одну точку, они взаимодействуют друг с другом (это явление называется интерференцией) и образуют результирующую волну. Результирующая

¹ Этому же правилу подчиняются радиусы зон у всех типов круговых зонных пластинок, рассматриваемых ниже.

волна является функцией пути света от источника до точки интерференции. Если волны света приходят в точку интерференции в одной фазе, то амплитуда результирующей волны возрастет. Это так называемая конструктивная интерференция (рис. 1.3 на цветной вклейке). Если волны в точке интерференции окажутся в противофазе, они погасят друг друга. Разница оптического пути в этом случае составляет половину длины волны $\lambda/2$. Такая интерференция называется деструктивной. Если длина пути отдельных волн отличается на величину менее половины длины волны (сдвиг фаз), то наблюдается третий вариант взаимодействия, так называемая частично деструктивная интерференция. Результирующая волна может иметь амплитуду, не совпадающую (больше или меньше) с амплитудой отдельных волн.

Однако, как предложил Френель, если изготовить непрозрачный экран, который оставлял бы открытыми только нечетные зоны (считая от первой центральной зоны), и поместить его в соответствующем месте сферической волны, то амплитуда колебаний в главном фокусе резко возрастет. Такой экран впоследствии получил название *амплитудной зонной пластинки Френеля* (рис. 1.4, а). Дифракционная эффективность зонной пластинки Френеля невелика и составляет в основном фокусе (+1-м порядке дифракции) $\sim 10\%$ падающего света. Под дифракционной эффективностью понимается доля энергии освещающего пучка света, направляемого дифракционным оптическим элементом в заданную область пространства [62].

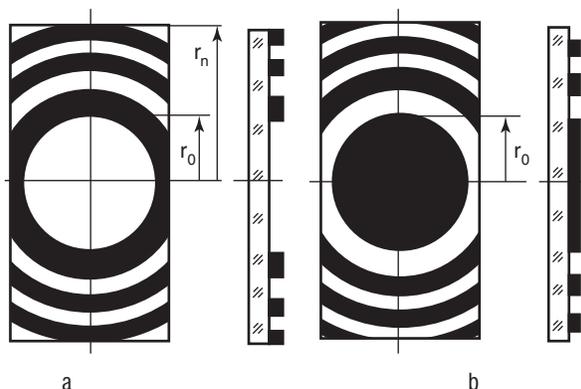


Рис. 1.4. Амплитудные зонные пластинки: а — Френеля; б — Соре

Амплитудная зонная пластинка с непрозрачной центральной зоной (открытыми четными зонами; рис. 1.4, б) была предложена в 1885 г. швейцарским ученым Ш. Соре (1854–1904) и вошла в историю под его име-

нем — *амплитудная зонная пластинка Соре*¹. Дифракционная эффективность зонной пластинки Соре такая же, как у зонной пластинки Френеля.

Несмотря на то что при прохождении света через пластинку Френеля и Соре половина энергии теряется, а оставшаяся часть распределяется по многим порядкам, фокусирующие свойства амплитудных пластинок позволяют их рассматривать в качестве линз.

Между тем можно достичь большей яркости изображения, увеличивая дифракционную эффективность основного фокуса. В 1888 г. Джон Уильям Стрэт (лорд Рэлей, 1842–1919) предложил не исключать электромагнитные колебания от непрозрачных зон, а изменять фазу этих колебаний таким образом, чтобы они шли с задержкой в полдлины волны [73]. В 1898 г. эту идею практически реализовал выдающийся американский физик-экспериментатор Роберт Вильямс Вуд. Он покрыл плоскопараллельную стеклянную пластинку слоем лака определенной толщины и выгравировал на ней рисунок зон [16]. Световые волны, проходя через слой лака, получали отставание по фазе, согласно расчетам лорда Рэля. Зонная пластинка, у которой оптическая толщина нечетных зон отличается от толщины четных на величину $\lambda/[2(n(\lambda) - 1)]$ [где $n(\lambda)$ — показатель преломления оптического материала], получила название *линзы Рэля–Вуда* (рис. 1.5), а сам тип таких пластинок — *фазовые зонные пластинки*. В основном фокусе линзы Рэля–Вуда собирается 40,6% энергии проходящего через нее света.

Сдерживающими факторами практического применения зонных пластинок на протяжении достаточно длительного периода времени являлись: сложность их расчетов и изготовления, значительная и принципиально неисправимая хроматическая аберрация, низкая оптическая эффективность. И только по мере развития компьютерной оптики и фототехнологий появились новые способы производства зонных пластинок и нашлись области их практического применения.

Зонная пластинка, названная по имени ученого, открывшего голографию, линзой Габора (*интерференционная амплитудная линза Габора*) [29, 276], была получена голографическим путем за счет интерференции сферических световых волн (рис. 1.6). Линза имеет зоны с синусоидальным амплитудным пропусканием.

¹ В статье J.A. Davison, M.J. Simpson «History and development of the apodized diffractive intraocular lens» (J Cataract Refract Surg. 2006. Vol. 32. N. 5. P. 849–858) на рис. 4В изображена именно пластинка Соре, а не зонная пластинка Френеля, как явствует из подписи к рисунку. Различия между этими зонными пластинками весьма принципиальны. Амплитудная пластинка Френеля формирует в фокусе центральное световое пятно, в то время как пластинка Соре дает затемнение в центре.

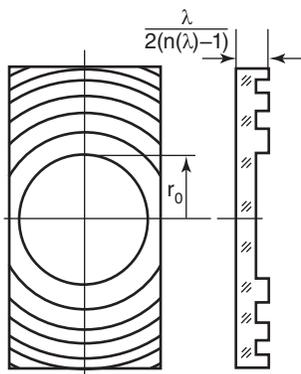


Рис. 1.5. Линза Рэлея–Вуда

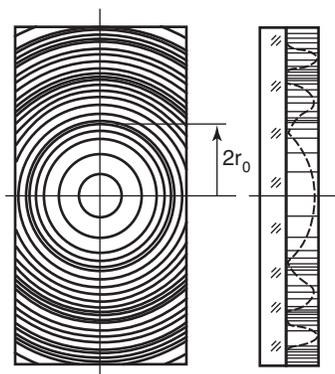


Рис. 1.6. Интерференционная амплитудная линза Габора

Путем отбеливания точечной голограммы амплитудной линзы Габора была изготовлена фазовая пластинка с синусоидальным профилем (рис. 1.7), которая получила название *фазовой линзы Габора* [29] и по сути была аналогична переходу от зонной пластинки Френеля к линзе Рэлея–Вуда.

Все вышеперечисленные зонные пластинки имеют общий недостаток, ограничивающий их применение в качестве линз, — разбрасывание энергии в разные (так называемые паразитные) порядки дифракции. Этот недостаток вытекает из того, что оптическая длина пути, соединяющего точку-объект и изображение, в пределах одной зоны непостоянна. Однако ее можно сделать постоянной, придавая зонной пластинке особый профиль, определяемый условием, что на протяжении всей зоны оптическая длина пути постоянна, а при переходе с одной зоны на следующую происходит скачок фазы волны на 2π .

Зонная пластинка, в которой вся энергия, проходящая через нее, концентрируется в главном фокусе, впервые была предложена в 1957 г. советским ученым Г.Г. Слюсаревым [71]. И хотя в работе [231] авторы отдают пальму первенства К. Miyamoto [441],

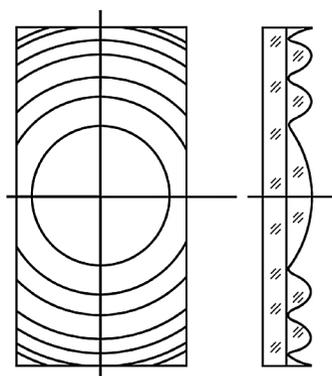


Рис. 1.7. Интерференционная фазовая линза Габора