

ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫЕ ИНТРАОКУЛЯРНЫЕ ЛИНЗЫ
Чередник В.И., Треушников В.М.*

Нижегородский государственный университет

**Научно-производственное предприятие*

"Репер-НН"

Нижний Новгород, Россия

Благодаря достижениям современной офтальмохирургии замена помутневшего из-за катаракты естественного хрусталика искусственным выполняется в настоящее время быстро и без каких-либо осложнений. Искусственный хрусталик (интраокулярная линза – ИОЛ) устанавливается на место удаленного естественного хрусталика через сверхмалый самогерметизирующий разрез. Качество изображения, даваемого искусственным хрусталиком, не уступает качеству изображения, даваемого нормальным естественным хрусталиком, и может даже превосходить его. Единственный функциональный параметр естественного хрусталика, который остается пока недостижимым для искусственного хрусталика – это возможность аккомодации, изменения кривизны преломляющих поверхностей для обеспечения возможности резкого видения во всем диапазоне расстояний от бесконечности до 25-30 см. ИОЛ простейшей конструкции представляет собой линзу с фиксированным положением единственного фокуса, которое может быть установлено на резкое видение либо удаленных, либо близких объектов - по выбору пациента. Для коррекции зрения на других расстояниях требуются очки.

Для частичной компенсации потерянной аккомодационной возможности в настоящее время широко используются бифокальные ИОЛ. Обычно один из двух фокусов обеспечивает возможность резкого видения удаленных объектов, другой – близких. Конструктивное исполнение бифокальных ИОЛ является существенно более сложным, чем монофокальных. В настоящее время существует два основных типа бифокальных ИОЛ – рефракционные и дифракционно-рефракционные.

В линзах рефракционного типа разделение энергии светового потока между двумя фокусами выполняется за счет радиальной ступенчатой зависимости преломляющей силы линзы. Центральная часть линзы преломляет сильнее, чем периферийная, или наоборот. Это достигается либо за счет того, что у центральной и периферийной частей линзы разные радиусы кривизны, либо за счет различия показателей преломления центра и периферии. В линзе может быть и несколько участков с различной преломляющей силой, образующих несколько кольцевых зон. В любом случае ход лучей через все зоны линзы полностью описывается законами геометрической оптики, законами рефракции.

Недостаток рефракционных бифокальных линз заключается в том, что при уменьшении диаметра зрачка при ярком освещении периферийные участки линзы могут оказаться полностью закрытыми и в этом случае бифокальные свойства хрусталика теряются. Для сохранения бифокальных свойств при уменьшении диаметра зрачка необходима конструкция ИОЛ с большим количеством кольцевых зон, преломляющая сила которых повторяется через одну. Одна половина зон обеспечивает ход лучей в один фокус, другая половина – в другой. Если при минимальном диаметре зрачка (около 3 мм) остаются открытыми не менее двух таких зон, бифокальные свойства ИОЛ остаются независимыми от диаметра зрачка при любом освещении. Но при большом количестве зон и соответственно при малой ширине каждой из них прохождение света через ИОЛ перестает подчиняться законам геометрической оптики из-за волновой природы света. Пространственное распределение световой энергии после прохождения светом линзы с мелкомасштабными оптическими неоднородностями определяется законами волновой оптики, законами дифракции.

В типичных дифракционно-рефракционных линзах одна из поверхностей является монофокальной преломляющей (гладкой), а на другую поверхность наносится мелкоструктурный кольцевой рельеф обычно с треугольным профилем вдоль радиального направления. Дифракционное распределение света обеспечивается этим рельефом. Подбором преломляющей силы (кривизны) гладкой преломляющей поверхности можно воздействовать на продольное смещение дифракционных максимумов, обеспечивая тем самым требуемую преломляющую силу всей ИОЛ.

Для описания дифракционных явлений используется принцип Гюйгенса-Френеля. Точечный источник света окружается воображаемой замкнутой поверхностью произвольной формы. Световая волна, дошедшая до произвольной точки этой поверхности, возбуждает в этой точке колебания, в результате эту точку можно теперь интерпретировать как источник вторичной волны, распространяющейся от этой точки по всем возможным направлениям. Амплитуда колебаний световой волны в произвольной точке пространства за пределами поверхности вторичных источников определяется путем сложения всех вторичных волн, пришедших в эту точку от всех вторичных источников. Результат сложения двух волн, пришедших в одну точку, зависит от разности фаз колебаний в пришедших волнах. Если фазы одинаковы (синфазные колебания), суммарная амплитуда равна сумме амплитуд, если фазы противоположны (противофазные колебания), суммарная амплитуда равна разности амплитуд. Разность фаз колебаний в двух волнах определяется, в свою очередь, разностью начальных фаз колебаний соответствующих вторичных источников и разностью оптических длин пути этих волн. Оптическая длина пути – это произведение геометрической длины пути на показатель преломления среды.

Таким образом, рассчитывая амплитуду суммарной волны в каждой точке пространства, можно получить пространственное распределение интенсивности света (пропорциональной квадрату амплитуды), даваемое произвольной

оптической системой. Аналитический расчет в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля возможен лишь для некоторых простейших частных случаев, например, для дифракции на длинной узкой щели и на круглом отверстии. В последнем случае для оценки амплитуды суммарной волны в произвольной точке на оси симметрии системы поверхность вторичных источников совмещают с той частью волнового фронта, которая укладывается в отверстие. Эту часть волнового фронта мысленно разбивают на кольцевые зоны. Радиусы зон подбираются таким образом, чтобы расстояния от внешнего и внутреннего края каждой зоны до точки на оси, в которой оценивается амплитуда световой волны отличались на половину длины световой волны. Получающиеся при таком разбиении кольцевые зоны называются зонами Френеля. Поскольку все вторичные источники на волновом фронте синфазны (по определению волнового фронта), то две волны от двух краев каждой зоны приходят в точку наблюдения в противофазе (так как разность хода равна полволны) и практически полностью гасят друг друга. В этом случае колебания от каждой пары соседних зон Френеля также практически полностью гасят друг друга, так как для любой вторичной волны, приходящей в точку наблюдения из одной зоны, всегда найдется вторичная волна из соседней зоны, такая, что разность хода между этими двумя волнами в точке наблюдения будет равна полволны. В этом и заключается удобство разбиения волнового фронта на кольцевые зоны Френеля. Если на отверстии укладывается четное количество этих зон, то колебания в точке наблюдения от каждой пары соседних зон будут гасить друг друга и в точке наблюдения будет иметь место дифракционный минимум – темное пятно. Если на отверстии укладывается нечетное количество зон Френеля, то одна из зон останется нескомпенсированной и в точке наблюдения будет дифракционный максимум – светлое пятно. Если закрыть зоны Френеля через одну непрозрачной преградой (зонная пластинка), то волны от всех незакрытых зон будут усиливать друг друга в точке наблюдения и там будет иметь место дифракционный максимум, интенсивность которого во много раз больше интенсивности максимума для случая, когда на отверстии нечетное количество зон и все они открыты. Если зоны через одну не закрывать, а каким-либо способом изменить фазу волны на выходе из каждой такой зоны на противоположную, то волны от всех без исключения зон Френеля будут усиливать друг друга в точке наблюдения и дифракционный максимум будет еще больше, чем в предыдущем случае. Если в отверстии ничего нет, то такое изменение фазы на противоположную можно получить, поместив на пути волны прозрачную пластинку, на которую нанесены кольцевые канавки напротив каждой четной или нечетной зоны с глубиной, обеспечивающей дополнительную оптическую разность хода лучей, проходящих через соседние зоны, в половину длины волны. Это фазовая зонная пластинка. Если в отверстии имеется линза, то такие кольцевые канавки можно нанести прямо на одну из поверхностей этой линзы. В результате получится дифракционно-рефракционная линза. Дифракционный максимум, даваемый этой линзой, вполне пригоден для получения изображения ничуть не хуже, чем рефракционный фокус обычной рефракционной линзы. Этот дифракционный максимум можно еще больше усилить. Глубина каждой канавки обычной фазовой зонной пластинки одинакова по всей ширине канавки, а промежутки между канавками являются плоскими. Это означает, что в пределах каждой зоны длина пути волны до точки наблюдения непрерывно увеличивается при увеличении радиальной координаты вторичного источника от внутреннего до внешнего края каждой зоны. Это значит, что вторичные волны, приходящие в точку наблюдения от вторичных источников в пределах каждой зоны, приходят туда не в одинаковой фазе. Не в противофазе (за исключением двух крайних точек зоны), но и не в одинаковой фазе. Это и есть последний резерв увеличения интенсивности дифракционного максимума. Изменение фазы в пределах каждой зоны может быть скомпенсировано переменной глубиной канавок. Если нанести канавки переменной глубины, каждая из которых будет перекрывать две соседние зоны Френеля, а глубина каждой канавки будет непрерывно увеличиваться по мере удаления от центра от нуля до величины, обеспечивающей дополнительную разность хода в одну длину волны, то все волны и от соседних зон, и в пределах каждой зоны будут приходить в точку наблюдения в одинаковой фазе и давать дифракционный максимум предельно большой амплитуды. Интенсивность света в этом максимуме почти не уступает интенсивности света в фокусе обычной монофокальной рефракционной линзы. Возникает естественный вопрос – зачем применять такую сложную конструкцию линзы, чтобы получить интенсивность света в максимуме, не превосходящую интенсивность в фокусе простой рефракционной линзы? С точки зрения получения изображения это действительно бессмысленно, если дифракционно-рефракционная линза используется как монофокальная линза. Поэтому дифракционно-рефракционные линзы используются исключительно в качестве мультифокальных линз. Наличие нескольких дифракционных максимумов является характерным свойством самого явления дифракции, обусловленным волновой природой света. Дифракционные максимумы наблюдаются в тех точках, в которые вторичные волны приходят с разностью хода в любое целое число длин волн, и таких точек может быть достаточно много. Распределение энергии света по всем этим максимумам обычно не бывает одинаковым. Для рассмотренной выше линзы с треугольным дифракционным профилем имеется только один дифракционный максимум, пригодный для формирования изображения с интенсивностью, практически такой же, как в фокусе рефракционной линзы. Это дифракционный максимум 1-го порядка. Интенсивность света во всех остальных максимумах более высокого порядка очень мала и эти максимумы непригодны для получения изображения. Линза, максимальная глубина треугольных канавок которой соответствует разности хода в одну длину волны, является таким образом, практически монофокальной линзой. Если глубина канавок равна нулю (канавок просто нет), то дифракционный расчет с применением принципа Гюйгенса-Френеля дает дифракционный максимум в том самом месте, где находится рефракционный фокус данной линзы. В этой точке разность хода всех лучей, прошедших через линзу по законам геометрической оптики, равна нулю. Таково свойство линзы (идеальной). Следовательно, в этой точке будет максимум интенсивности по законам как геометрической, так и волновой оптики. Это дифракционный максимум нулевого порядка. Его положение совпадает с положением рефракционного фокуса и не совпадает с положением дифракционного максимума первого порядка. Дифракционного максимума первого порядка нет в этом случае. Если имеются канавки с треугольным профилем и максимальной глубиной,

соответствующей разности хода в длину волны (полный профиль), то имеется только дифракционный максимум первого порядка и очень слабые максимумы более высоких порядков. Дифракционного максимума нулевого порядка нет. В том и в другом случае линза является монофокальной. Если сделать максимальную глубину канавок треугольного профиля такой, которая обеспечивает разность хода примерно в половину длины волны (половинный профиль), то линза будет давать два максимума – нулевого и первого порядка примерно одинаковой интенсивности и некоторое количество максимумов более высоких порядков с очень малой интенсивностью.

Такие дифракционно-рефракционные интраокулярные линзы обычно и применяются на практике. Их основное достоинство заключается в том, что даже при очень хорошем освещении, т.е. при малом диаметре зрачка (около 3 мм) остаются открытыми несколько центральных дифракционных колец и мультифокальность линзы сохраняется. Максимум нулевого порядка располагается ближе к сетчатке и обеспечивает дальнейшее видение. Максимум первого порядка находится дальше от сетчатки и обеспечивает ближнее видение. Положение максимума нулевого порядка точно на сетчатке для дальнего видения обеспечивается надлежащим выбором радиуса кривизны рефракционной гладкой поверхности линзы. Расстояние между максимумами и тем самым положение максимума первого порядка на сетчатке для ближнего видения регулируется изменением радиусов кольцевых зон. Это положение чаще всего подбирается таким образом, чтобы обеспечивать дополнительную преломляющую силу около 3 дптр., т.е. расстояние ближнего видения около 33 см. Изменением глубины канавок можно воздействовать на распределение энергии между двумя фокусами. Например, в дифракционно-рефракционной линзе ReSTOR фирмы Alcon используются треугольные канавки с уменьшающейся глубиной по мере удаления от центра линзы (аподизированный треугольный профиль). Это обеспечивает увеличение доли света, проходящей на дальний фокус, при увеличении диаметра зрачка, т.е. при ухудшении освещения интенсивность света в максимуме, обеспечивающем дальнее видение, увеличивается, а ближнее зрение соответственно ухудшается. По мнению авторов этой конструкции в темноте человеку незачем что-либо видеть вблизи, главное, чтобы все было видно вдали. Бифокальный при хорошем освещении хрусталик ReSTOR превращается практически в монофокальный для дальнего зрения в темноте.

Бифокальный хрусталик в значительной степени компенсирует утерянную аккомодационную способность глаза, но все же не полностью. Остается диапазон средних дистанций (примерно 0.5 – 10 м), недоступных для четкого зрительного восприятия. Для обеспечения хорошего видения и на средних дистанциях необходим еще хотя бы один фокус. Дифракционно-рефракционные линзы с треугольным профилем непригодны для этих целей в принципе. Они дают только два максимума. Три дифракционных максимума может обеспечить дифракционный рельеф прямоугольного профиля, известный в литературе под названием бинарный рельеф. Канавки прямоугольного профиля дают два примерно равных дифракционных максимума – первого и минус первого порядка, если глубина канавок соответствует дополнительной разности хода в половину длины волны (ширина каждой канавки равна ширине соответствующей зоны Френеля). При нулевой глубине получается один максимум нулевого порядка. При глубине канавок, соответствующей примерно четверти длины волны, имеют место все три максимума – нулевого, первого и минус первого порядка, примерно равной интенсивности. Максимум минус первого порядка обеспечивает дальнее видение, максимум нулевого порядка – среднее и максимум первого порядка обеспечивает ближнее видение. Расстояние между максимумами также может меняться изменением радиусов кольцевых зон, относительная интенсивность максимумов – глубиной канавок, а настройка на индивидуальное зрение – кривизной рефракционной гладкой поверхности. Небольшое уменьшение интенсивности максимумов по сравнению с рельефом треугольного профиля (основная энергия делится на три части вместо двух) вряд ли имеет практическое значение, учитывая способность сетчатки адаптироваться к изменениям освещенности в чрезвычайно широком диапазоне.

На научно-производственном предприятии "Рефер-НН" были разработаны и изготовлены методом фронтальной фотополимеризации трифокальные интраокулярные линзы с прямоугольным дифракционным профилем. Все расчеты конкретной конструкции были выполнены с помощью полной компьютерной модели оптической системы глаза. На сегодняшний день выполнена имплантация нескольких десятков таких искусственных хрусталиков. Первые клинические исследования демонстрируют отличные результаты. Все пациенты видят одинаково хорошо вдали, вблизи и на средних дистанциях. Таких результатов не может обеспечить ни один бифокальный хрусталик.

У дифракционно-рефракционных ИОЛ есть один недостаток – в определенных условиях вокруг яркого объекта (лампочки, например) иногда могут наблюдаться ореолы. Это не обусловлено конструктивными недостатками ИОЛ, а является неотъемлемым свойством самого явления дифракции. Вокруг центрального максимума на главной оси имеются кольцевые максимумы меньшей интенсивности, которые и проявляются таким образом. Чаще всего, пациенты без большого труда адаптируются к этой небольшой помехе.