

## Основы оптики прогрессивных очковых линз

Д.Мейстер, специалист Carl Zeiss Vision

В предыдущих номерах журнала мы опубликовали две статьи этого автора, посвященные особенностям FreeForm прогрессивных и однофокальных очковых линз. Простота и доступность изложения довольно трудных вопросов по оптике очковых линз сложных дизайнов делают статьи Д.Мейстера очень востребованным среди оптиков, занимающихся подбором современных очковых линз. Благодаря усилиям компании «Оптик Диас», являющейся эксклюзивным дистрибьютором в России очковых линз компании Carl Zeiss Vision, мы имеем возможность продолжить публикацию статей этого автора в нашем журнале. Статьи будут печататься в течение 2013 г. в рамках рубрики «Академия Carl Zeiss Vision». Материалы печатаются с разрешения автора.

### Поверхности прогрессивных линз

Прогрессивные линзы (в англоязычной литературе их часто сокращенно называют PAL – a progressive addition lens) – это мультифокальные линзы, у которых оптическая сила поверхности плавно увеличивается (на положительную добавку). Кривизна поверхности у таких линз возрастает от минимального значения в зоне для зрения вдаль (в верхней части линзы) до максимальной величины в зоне для зрения вблизи (в нижней части линзы) (рис 1.). Величина, на которую увеличивается оптическая сила (т.е. разница между максимальным и минимальным значениями), называется аддидацией (Add). Это постепенное увеличение оптической силы обеспечивает переменное фокусное расстояние линзы, необходимое для зрения на промежуточных расстояниях.

Прогрессивные линзы обеспечивают требуемую величину аддидации без какого-либо разрывы или видимой границы, разделяющей зоны линзы для зрения вдаль и вблизи. Переход между этими зонами выполнен достаточно плавно, чтобы не возникало резких скачков призматической силы и степени увеличения изображения, т.е. «скачка изображения». Такое сглаживание перехода между двумя зонами обеспечивается введением на периферии линзы цилиндра пере-

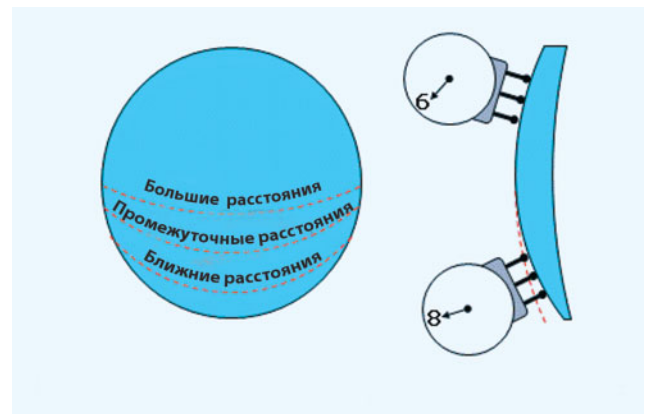


Рис. 1. Кривизна поверхности прогрессивной линзы постепенно увеличивается сверху вниз, чтобы обеспечить необходимую величину аддидации при переводе взгляда от удаленных объектов к расположенным вблизи (т.е. во всем диапазоне расстояний).

менной оптической силы, ориентированного под углом к вертикальной оси линзы (рис. 2).

С помощью такого положительного цилиндра, ориентированного под углом, можно соединить плоскую и крутую зоны линзы, не нарушая непрерывности самой поверхности. Однако геометрия прогрессивной поверхности гораздо более сложная



#### Об авторе

Даррил Мейстер работает в компании Carl Zeiss Vision в качестве специалиста по техническим вопросам. Он является одним из самых молодых оптиков, удостоенных диплома высшей степени The American Board of Opticianry (ABO Master). Д. Мейстер участвовал в подготовке ряда стандартов (ANSI Z80), имеет публикации в известных профессиональных изданиях (Optical World, Clinical and Experimental Optometry и др.), его часто приглашают читать

лекции такие организации, как Opticians Association of America, Berkeley's School of Optometry, the Contact Lens Society of Ophthalmologists. Д.Мейстер является автором нескольких публикаций, одобренных ABO для включения в образовательный курс для получения сертификата ABO Continuing Education Certificate.

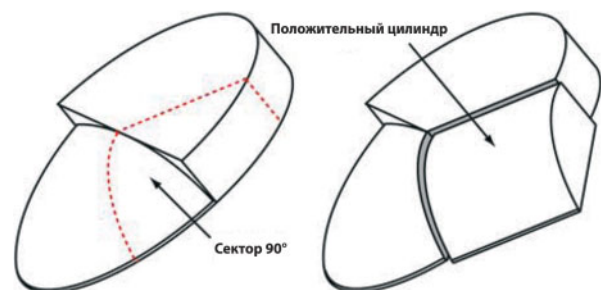


Рис. 2. Уступ на поверхности линзы в месте соединения зон с разной кривизной поверхности может быть устранен с помощью цилиндра. На примере бифокальных линз Executive показано, как на место удаленного сектора 90° вставляется положительный цилиндр.

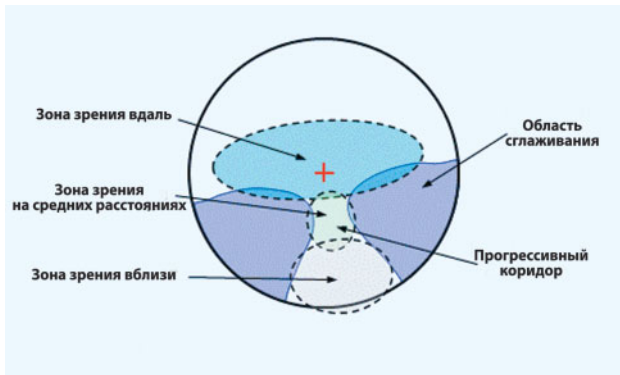


Рис. 3. Характерные зоны прогрессивной линзы универсального назначения

— используется цилиндр, у которого изменяется не только оптическая сила, но и его ориентация. Традиционные прогрессивные линзы универсального назначения имеют 4 характерные поверхностные зоны (рис. 3):

1. Зона зрения вдаль: стабильная область в верхней части линзы с оптической силой, назначенной для зрения вдаль
2. Зона зрения вблизи: стабильная область в нижней части линзы с величиной аддидации для чтения
3. Прогрессивный коридор: коридор с нарастающей оптической силой, соединяющий обе зоны и используемый для зрения на промежуточных расстояниях.
4. Область сглаживания: периферические зоны с нежелательной оптической силой цилиндра, практически не используемые для зрения.

### Характеристики прогрессивной оптики

Хотя центральные области поверхности прогрессивной линзы можно считать относительно сферическими, в большинстве точек поверхности имеется некоторая степень цилиндрической силы. Это означает, что кривизна в этих точках будет разной по разным меридианам. Силу цилиндра в каждой точке прогрессивной линзы часто называют поверхностным астигматизмом, поскольку сила цилиндра индуцирует вместо точечного астигматического фокуса.

Поверхностный астигматизм изменяется по поверхности прогрессивной линзы. Он практически отсутствует вдоль коридора прогрессии, но возрастает на периферии, в зоне сглаживания. В этих зонах поверхностный астигматизм создает значительные уровни нежелательной цилиндрической силы, которые пользователи прогрессивными линзами могут воспринимать как размытие изображения, искажение его формы и как «плавающий эффект» изображения.

Поскольку каждую точку в области сглаживания прогрессивной линзы можно представить как небольшой цилиндр, это дает возможность оценить оптику прогрессивной линзы измерением силы цилиндра



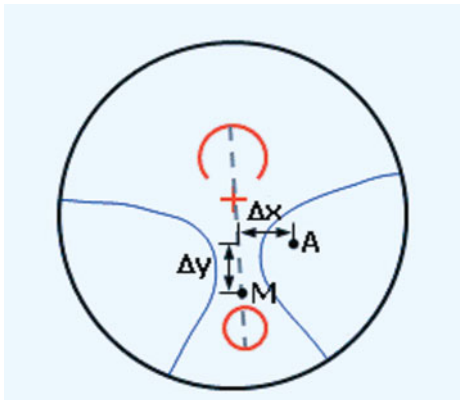
Рис. 4. Контурные карты с изолиниями, соединяющими точки с одинаковой оптической силой, показывают, как изменяется качество оптики по поверхности линзы.

ра в этих точках. Результаты таких измерений часто представляют в виде контурной карты линзы, показывающей, как изменяется оптическая сила по поверхности линзы (рис. 4). Астигматические контурные карты показывают области возможного размытия изображения, возникновения эффект «плавающего изображения», искажения его формы. Такие карты полезны для оценки размеров зоны зрения вдаль, вблизи и на промежуточных расстояниях.

Можно сказать, что каждая прогрессивная линза имеет свою уникальную астигматическую карту, которая является как бы «отпечатком пальца» определенного дизайна линзы. Полезно также оценить распределение величина аддидации по поверхности линзы. Поскольку большинство точек поверхности прогрессивной линзы имеют цилиндрический компонент, то измеряют также сферический эквивалент оптической силы или среднее значение оптической силы для каждой точки поверхности линзы. Контурные карты средней величины оптической силы показывают положение зоны зрения вблизи, а также областей с избыточной положительной силой, которая может влиять на четкое зрение вдаль.

Хотя контурные карты поверхностного астигматизма и средней величины аддидации являются наиболее распространенными способами количественной оценки оптического качества прогрессивных линз, тем не менее, с их помощью нельзя предсказать эффект их комбинированного действия на зрение. На размытие изображения влияет как нежелательный астигматизм, так и слишком большая (или маленькая) величина аддидации. Среднеквадратическое значение (RMS) оптической силы включает в себя ошибки (т.е. отклонение от требуемых значений) как оптической, так и цилиндрической силы. RMS оптической силы является более клинически важной характеристикой оптического качества и полезна для оценки степени размытия изображения и остроты зрения.

Анализ волнового фронта также можно применять для характеристики качества оптики прогрессивной линзы, хотя он менее распространен (*От ред.: С момента написания автором этой статьи анализ волно-*



**Рис. 5.** Теорема Минквица утверждает, что в окрестности коридора прогрессии величина нежелательного астигматизма в боковом направлении (точка А) примерно в 2 раза больше изменения величины аддидации на таком же расстоянии вдоль коридора прогрессии (точка М,  $\Delta x \approx \Delta y$ ).

вого фронта стал широко применяться ведущими мировыми производителями для расчета дизайна прогрессивных FreeForm линз). Эта методика позволяет кроме силы сферы и цилиндра, которые в основном определяют остроту зрения в большинстве случаев (это aberrации низших порядков), оценить также величину aberrаций высших порядков, включая сферические aberrации и разные виды комы. Aberrации волнового фронта обычно выражают в виде полиномов Цернике (иногда – Зернике) или ряда Тэйлора, представляющих собой математические функции, члены которых количественно выражают среднюю ошибку оптической силы, астигматизм, кому и др. aberrации.

Контурные карты поверхностного астигматизма и средней оптической силы – традиционный способ демонстрации различных оптических величин, но они только показывают качество оптики линзы. Более того, контурные карты поверхностной силы обычно менее показательны, чем контурные карты оптического качества вдоль зрительных линий (ray-traced). Такие карты рассчитывают, используя математическую модель системы линза-глаз для определения, как

именно пользователь очками будет воспринимать оптику линзы.

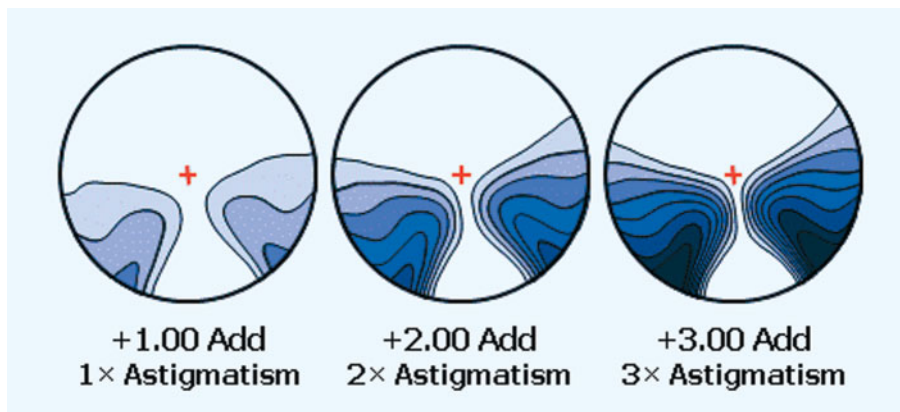
## Теорема Минквица

У прогрессивных линз с хорошо рассчитанным дизайном величина нежелательного периферического астигматизма сведена в теоретическому минимуму. Однако некоторый уровень оптической силы нежелательного цилиндра необходим для того, чтобы сгладить любые поверхности с аддидацией. Минквиц теоретически показал, что величина изменения нежелательного астигматизма ( $\Delta \text{Cyl}$ ) на небольшом расстоянии от центральной линии коридора прогрессии (в точке А) примерно в 2 раза больше величины изменения аддидации ( $\Delta \text{Add}$ ) на таком же расстоянии вдоль центральной линии коридора прогрессии (в точке М)<sup>1</sup> (рис. 5):  $\Delta \text{Cyl} \approx 2 * \Delta \text{Add}$ .

Средняя скорость изменения аддидации вдоль прогрессивного коридора равна полной величине аддидации, деленной на длину L коридора прогрессии линзы ( $\Delta \text{Add} = \text{Add}/L$ ). Это означает, что скорость изменения аддидации прямо пропорциональна Add и обратно пропорциональна длине коридора прогрессии линзы. Теорема Минквица определяет два важнейших свойства оптики в центральной области прогрессивной линзы:

1. Величина изменения силы нежелательного цилиндра при отклонении в стороны от прогрессивного коридора увеличивается с уменьшением длины коридора прогрессии. Это означает, что линзы с более коротким коридором прогрессии будут иметь большие значения нежелательного астигматизма и меньшие зоны четкого зрения по сравнению с линзами, у которых коридор длиннее.

2. Величина изменения силы нежелательного цилиндра при отклонении в стороны от прогрессивного коридора увеличивается с увеличением величины аддидации.



**Рис. 6.** Величина поверхностного астигматизма линзы пропорциональна Add линзы. Нежелательный астигматизм линзы с Add +3,00 D примерно в 3 раза больше нежелательного астигматизма линзы с аддидацией +1,00 D, а астигматизм линзы с Add +2,00 D в 2 раза больше астигматизма линзы с аддидацией +1,00 D.

Это означает, что величина нежелательного астигматизма на периферии линзы возрастает примерно в той же степени, в какой увеличивается Add линзы (рис. 6).

### Распределение оптики по поверхности

Одной из основных характеристик дизайна прогрессивной линзы является распределение по ее поверхности оптических параметров, включая поверхностный астигматизм и величины аддидации. Оптическое качество дизайна определяется полностью величиной, распределением и скоростью изменения силы нежелательного цилиндра и аддидации. Дизайны прогрессивных линз в зависимости от распределения поверхностного астигматизма часто подразделяют на «мягкие» и «жесткие».

- **Жесткие дизайны.** У «жестких» прогрессивных дизайнов астигматизм сконцентрирован в небольших областях поверхности линзы. Это позволяет расширить зоны четкого зрения за счет увеличения уровней нежелательного астигматизма на периферии линзы. Следовательно, прогрессивные линзы с более жесткими дизайнами обычно предлагают более широкие поля четкого зрения вдаль и вблизи, но при взгляде через периферию у таких линз больше размытие и искажение формы.

- **Мягкие дизайны.** У «мягких» дизайнов нежелательный астигматизм распределен по большей площади поверхности линзы. Это позволяет уменьшить величину нежелательного астигматизма за счет сужения зон четкого зрения. Следовательно, прогрессивные линзы с более мягким дизайном обычно обладают меньшими размытием и искажениями на периферии.

По мере того, как увеличивается область, используемая для «сглаживания» зон зрения вдаль и вблизи, уровни поверхностного астигматизма уменьшаются за счет распределения этой области по большей площади. Более жесткие дизайны обычно лучше подходят для выполнения зрительной работы, требующей хорошей остроты зрения, а мягкие дизайны — для динамического зрения. Кроме того, мягкие дизайны, как правило, улучшают зрительный комфорт и облегчают адаптацию начинающим пользователям прогрессивными линзами, в то время как жесткие дизайны предлагают качество зрения, близкое к тому, которое имеют пользователи бифокальными линзами (рис. 7).

Современные прогрессивные дизайны редко можно отнести строго к категории «жесткие» или «мягкие», их дизайн скорее занимает промежуточное положение для обеспечения наилучшего зрения в целом. Причем нужный баланс может достигаться по-разному для разных базовых кривых и/или значений аддидации. Разрабатывающий дизайн специалист может руководствоваться философией обоих типов дизайна. Например, мягкий дизайн

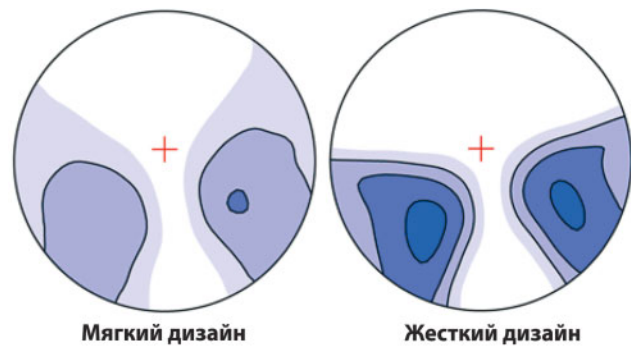


Рис. 7. Астигматические карты показывают, что у «мягкого» дизайна нежелательный астигматизм увеличивается с меньшей скоростью и распределен по большей площади по сравнению с «жестким» дизайном.

периферии может быть соединен с жестким дизайном областей, прилегающих к периферии, чтобы улучшить динамическое зрение вдаль, сохранив при этом широкую зону зрения вблизи.

### Зрение и прогрессивные линзы

Прогрессивные линзы для того, чтобы давать хорошее качество зрения и быть удобными в использовании, должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Обеспечивать хорошее основное зрение
2. Обеспечивать хорошее динамическое зрение
3. Обеспечивать хорошее бинокулярное зрение
4. Быть эргономичными.

Эти факторы обычно взаимосвязаны. Например, улучшение динамического зрения в мягких прогрессивных дизайнах может ухудшать основное зрение из-за уменьшения размеров центральных зрительных зон. Аналогично, взаимосвязь нежелательного астигматизма и длины коридора прогрессии приводит к тому, что ее уменьшение с целью повышения удобства пользования линзами может также приводить к уменьшению размеров зрительных зон. Дизайнеры прогрессивных линз должны стремиться достичь наилучшего баланса между указанными зрительными потребностями для того, чтобы предоставить максимально высокое качество зрения пользователю прогрессивными линзами.

Этот баланс следует также иметь в виду, когда оценивают качество прогрессивных линз. Если рассматривать только основное зрение, то можно упустить из виду удобство пользования линзами в целом в различных жизненных ситуациях. Так, в одном исследовании было показано, что оценка прогрессивной линзы заметно изменялась в зависимости от того, что измеряли: динамическое зрение и комфорт или размер оптических зон центрального зрения.<sup>2</sup>

Окончание статьи и список литературы будут опубликованы в следующем номере журнала.