

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 382 561**

51 Int. Cl.:

**A61F 2/16** (2006.01)

**G02C 7/02** (2006.01)

12

### TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06743184 .1**

96 Fecha de presentación: **22.06.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **1903986**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **02.04.2008**

54 Título: **Lente intraocular astigmática**

30 Prioridad:  
**22.06.2005 DE 102005028933**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**11.06.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**11.06.2012**

73 Titular/es:  
**Carl Zeiss Meditec AG  
Göschwitzer Strasse 51-52  
07745 Jena , DE**

72 Inventor/es:  
**FIALA, Werner y  
KREINER, Christine**

74 Agente/Representante:  
**Aznárez Urbieto, Pablo**

ES 2 382 561 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Lente intraocular astigmática.

La presente invención se refiere a una lente intraocular (LIO) para corregir una ametropía astigmática.

Antecedentes de la invención

5 En general, las lentes sirven para transformar una onda luminosa en otra onda luminosa diferente. Una función esencial de la óptica de lentes es transformar una onda luminosa esférica procedente de un punto objeto de modo que la onda resultante también sea esférica y, por consiguiente, el punto imagen conjugado del punto objeto sea el centro de los frentes de onda esféricos resultantes. Una onda incidente desde un punto objeto es siempre esférica; si el punto objeto está a una distancia (prácticamente) infinita, la onda incidente es plana o llana. En lo sucesivo, el concepto "onda esférica incidente" también incluye ondas planas incidentes.

10 Los sistemas de lentes para reproducir un punto objeto en un punto imagen pueden incluir lentes o superficies refractivas que no presentan simetría rotacional. Estas lentes o superficies transforman una onda esférica incidente en una onda cuyos frentes de onda no tienen simetría de rotación; los frentes de onda están "distorsionados". En este caso, estos frentes de onda se transforman, mediante las llamadas lentes o superficies refractivas "astigmáticas", que a su vez tampoco tienen simetría de rotación, en ondas cuyos frentes de onda sí presentan simetría de rotación.

15 Un ejemplo conocido de superficie refractiva que transforma una onda esférica en una onda cuyos frentes de onda no presentan simetría de rotación es la superficie de una córnea astigmática o de un cristalino astigmático del ojo. En estos casos, los frentes de onda distorsionados se deben transformar en el ojo pseudofáquico, mediante lentes astigmáticas, en frentes de onda con simetría de rotación, por regla general en ondas esféricas. Para corregir el astigmatismo de la

20 córnea o del ojo, que esencialmente es atribuible a una córnea de forma no esférica (por ejemplo tórica) y/u otras anomalías del ojo, por ejemplo un cristalino sin simetría de rotación o una anomalía retinal, se utilizan lentes de contacto, lentes intraoculares y también cristales para gafas. Este documento se ocupa únicamente de las lentes intraoculares.

25 Algunas lentes intraoculares para corregir ametropías astigmáticas conocidas presentan una superficie límite de refracción cilíndrica o tórica y una superficie límite refractiva con simetría de rotación (esférica o asférica).

Una superficie tórica o de refracción tórica se produce por rotación de un segmento de arco circular o de una circunferencia alrededor de un eje que no contiene su centro. Si la distancia máxima entre la circunferencia y el eje de rotación es menor que el radio, la superficie tórica resultante se denomina superficie tórica "en barril"; si dicha distancia es mayor que el radio, se trata de una superficie tórica "en corsé" (según el Handbuch für Augenoptik, Editor: Carl Zeiss, página 23 (1977)). Los términos "tórico" y "astigmático" se emplean frecuentemente como sinónimos en el lenguaje común. A continuación se utiliza directamente la designación "tórico", aunque la superficie de lente así descrita no sea tórica en el sentido matemático.

30 Con una superficie de lente tórica se logra que la capacidad de refracción de la LIO en un meridiano sea diferente a la capacidad de refracción en el otro meridiano. Los dos meridianos son perpendiculares entre sí. La diferencia de las dos capacidades de refracción se denomina normalmente "cilindro de lente", ya que el efecto óptico de estas LIO tóricas corresponde al efecto de una combinación de una lente esférica y una lente cilíndrica. Una lente cilíndrica tiene una capacidad de refracción cero en el plano de incidencia de la luz que contiene el eje del cilindro y, en el plano de incidencia perpendicular a éste, presenta la máxima capacidad de refracción, que viene determinada esencialmente por el radio del cilindro y el índice de refracción de la lente cilíndrica. Por consiguiente, esta capacidad de refracción máxima de la lente cilíndrica se denomina de forma abreviada como "cilindro de lente" (en dioptrías). De lo arriba expuesto se deduce claramente que los dos meridianos de una lente tórica donde la capacidad de refracción de la lente presenta en un caso el valor máximo y en el otro caso el valor mínimo (los denominados meridianos principales) son perpendiculares entre sí y que la diferencia entre la capacidad de refracción máxima y la capacidad de refracción mínima es el cilindro de lente de la lente tórica.

35 Dicho de otro modo, la superficie tórica tiene radios de curvatura diferentes en los meridianos principales. En cada plano perpendicular al eje de la lente, la línea de intersección de la superficie límite refractiva con simetría de rotación (esférica o asférica) es un círculo y la línea de intersección de la superficie tórica es una elipse. El eje menor de esta elipse está determinado por el radio menor en el meridiano principal correspondiente, el eje mayor de la elipse está determinado por el radio de curvatura mayor en el otro meridiano principal. Debido a la forma elíptica, en el caso de la limitación de la superficie tórica por un plano, la superficie ópticamente activa para la mayor de las dos capacidades de refracción de la lente es menor que para la más pequeña de las dos capacidades de refracción.

40 La Figura 1a muestra esquemáticamente la proyección de la superficie tórica de una LIO tórica convencional. En esta figura, el número 1 designa el meridiano con la menor de las dos capacidades de refracción y el número 2 designa el meridiano con la mayor de las dos capacidades de refracción. El radio R1 del meridiano 1 es mayor que el radio R2 del meridiano 2, es decir  $R1 > R2$ . La elipse 7 de la superficie refractiva tórica 5 proyectada sobre una superficie plana 6 tiene un eje menor 3 y un eje mayor 4. La superficie ópticamente activa está limitada al área interior de la elipse de la Figura 1a. La Figura 1b muestra la proyección de la otra superficie refractiva 8, es decir la superficie esférica, de la lente

tórica convencional. La línea de intersección de esta superficie refractiva con un plano consiste en un círculo cuyas "longitudes de eje" 3' y 4' son trivialmente iguales a lo largo de los dos meridianos 1' y 2'.

La Figura 2 muestra una representación esquemática en perspectiva de una lente de este tipo con un grosor marginal 9 constante a lo largo de todo el perímetro.

- 5 Por consiguiente, en general las lentes tóricas convencionales con un grosor marginal constante dado presentan una superficie ópticamente activa que se reduce a la superficie de una elipse.

Además, las lentes tóricas convencionales presentan dos superficies refractivas, una de ellas esférica y la otra tórica; las líneas de intersección en los meridianos principales de la superficie de lente tórica están determinadas por las ecuaciones del círculo debido a su simetría de rotación, siendo los meridianos principales ortogonales entre sí, tal como se ha descrito más arriba. Sin embargo, estas lentes sólo son adecuadas en muy pocos casos para transformar los frentes de onda producidos por la refracción en superficies de refracción astigmática, como la córnea, en ondas esféricas.

10 El documento EP 0 949 529 A2 da a conocer una lente multifocal tórica que puede ser utilizada como lente intraocular. La lente presenta varias zonas de corrección visual para ver de cerca y de lejos. Cada zona de corrección visual está configurada como una superficie de lente de refracción tórica, presentando los dos meridianos principales en cada zona de corrección visual unos radios determinados, es decir, estando dichos meridianos principales curvados esféricamente. Tanto en la cara delantera como en la cara trasera de la lente pueden estar previstas zonas superficiales de refracción tórica. De este modo se puede lograr un efecto de cilindro óptico relativamente alto para la lente.

15 El objeto de la invención consiste en ampliar la superficie ópticamente activa de una LIO tórica (o astigmática) y mejorar las propiedades de corrección en caso de ametropía astigmática.

#### Objeto de la invención

Este objeto se resuelve según la invención mediante las características indicadas en la reivindicación 1.

Las curvas de intersección de la superficie de la lente refractiva tórica en planos paralelos al eje de la lente están descritas por una asfera en cada uno de los dos meridianos principales.

25 Preferentemente, la superficie anterior y la superficie posterior presentan una forma convexa. En los casos poco frecuentes de una lente negativa, las dos superficies son cóncavas. No obstante, en cualquier caso resulta ventajoso que la superficie anterior y posterior presenten la misma curvatura y, en consecuencia, que su refracción presente el mismo signo. De forma especialmente preferente, el efecto cilíndrico está distribuido de modo aproximadamente uniforme entre la superficie anterior y la posterior. La mayor superficie ópticamente activa se logra con una distribución uniforme, es decir, una superficie tórica idéntica en la cara delantera y en la cara trasera de la LIO. Evidentemente, el objeto de la invención también abarca distribuciones desiguales de la toricidad, en las que la optimización del tamaño de la superficie ópticamente activa pasa a segundo término con respecto a otras características de reproducción.

30 Las superficies cuya curva de intersección en un meridiano principal es esférica también se designan aquí como superficies de lente tóricas. Estas superficies se producen por la rotación de una curva que no tiene forma de arco circular, pues, en el caso de las superficies tóricas que siempre se producen por la rotación de una curva, al menos uno de los dos meridianos es circular. Aunque las superficies que no se pueden representar como el resultado de la rotación de una curva, porque sus curvas de intersección son esféricas en los dos meridianos principales, no son superficies "tóricas" en el sentido puramente matemático, aquí también se incluyen dentro del concepto de superficies tóricas. Las líneas de intersección de los planos paralelos al eje de la lente en los meridianos principales de estas superficies astigmáticas están determinadas por aquellas ecuaciones que son aplicables a curvas esféricas. Más adelante se tratará este tema con más detenimiento.

Si la superficie tórica de la LIO no se limita a la superficie que se puede generar mediante la rotación de un arco de circunferencia, la propiedad de reproducción de la LIO según la invención se puede adaptar mejor al frente de onda producido por la refracción de una onda esférica incidente en una superficie astigmática del ojo o la lente.

45 La lente intraocular puede presentar una superficie de lente de refracción tórica con dos meridianos principales que delimitan un ángulo entre ellos diferente de 90°. La superficie de lente opuesta también puede estar configurada a su vez de forma esférica con simetría de rotación o de forma esférica con simetría de rotación.

Las superficies refractivas en las que el meridiano con mayor capacidad de refracción forma un ángulo diferente de 90° con el meridiano de menor capacidad de refracción no se designan de forma estrictamente matemática como superficies "tóricas", pero aquí se incluyen dentro de dicho concepto.

50 Un ángulo entre los planos a través de los meridianos principales que no esté limitado al valor de 90° también es útil para adaptar mejor la propiedad de reproducción de la LIO según la invención a la forma específica del frente de onda producido por la refracción de una onda esférica incidente en una superficie astigmática del ojo o la lente.

En una forma de realización ventajosa, la invención también prevé que la lente intraocular combine las características de una superficie anterior de refracción tórica y una superficie posterior de refracción tórica con las características de al menos una superficie de lente de refracción tórica cuya o cuyas curvas de intersección de uno o dos planos paralelos al eje de la lente se describen mediante asferas en uno o en los dos meridianos principales.

5 Además, en otra forma de realización ventajosa, la invención prevé que la lente intraocular combine las características de una superficie anterior de refracción tórica y una superficie posterior de refracción tórica con las características de una superficie de lente de refracción tórica cuyos dos meridianos principales delimitan un ángulo entre ellos diferente de  $90^\circ$ .

10 La invención también prevé, en una forma de realización ventajosa, que la lente intraocular combine las características de una superficie de lente de refracción tórica cuya o cuyas curvas de intersección de uno o dos planos paralelos al eje de la lente se describen mediante asferas en uno o en los dos meridianos principales con las características de una superficie de lente de refracción tórica cuyos dos meridianos principales delimitan un ángulo entre ellos diferente de  $90^\circ$ .

15 Por último, en otra forma de realización ventajosa, la invención prevé que la lente intraocular combine las características de una superficie anterior de refracción tórica y una superficie posterior de refracción tórica con las características de al menos una superficie de lente de refracción tórica cuya o cuyas curvas de intersección de uno o dos planos paralelos al eje de la lente se describen mediante asferas en uno o en los dos meridianos principales, y con las características de una superficie de lente de refracción tórica cuyos dos meridianos principales delimitan un ángulo entre ellos diferente de  $90^\circ$ .

20 Mediante las características mencionadas, la LIO tórica según la invención (o en realidad la LIO para la corrección de una ametropía astigmática) se puede adaptar con mucha más precisión a la ametropía individual de una superficie astigmática del ojo a tratar, de modo que transforma los frentes de onda producidos por la refracción de la luz en dicha superficie astigmática no esférica (córnea, cristalino, etc.) en frentes de onda esencialmente esféricos. Dicho de otro modo, los rayos procedentes de un punto objeto y refractados por superficies de refracción astigmática (córnea, cristalino, etc.) son refractados por la LIO según la invención de modo que dicho punto objeto se reproduce esencialmente en exactamente un punto imagen. La reproducción del sistema total (que consiste en la superficie del ojo de refracción astigmática y la LIO según la invención) es estigmática. En este punto se ha de señalar que la LIO según la invención incluye tanto a las lentes intraoculares denominadas "fáquicas" como a las denominadas "pseudofáquicas", es decir, tanto las que se implantan en lugar del cristalino natural del ojo como las que se implantan además de éste.

30 Otras características y ventajas de la LIO según la invención se desprenden de las reivindicaciones dependientes. Éstas se explican en la siguiente descripción con referencia a las figuras adjuntas. En las figuras:

Fig. 1: proyección esquemática de la superficie tórica de una LIO tórica según el estado actual de la técnica;

Fig. 2: representación esquemática en perspectiva de la LIO conocida de la Fig. 1;

35 Fig. 3: proyección esquemática de la superficie frontal de la lente (Fig. 3a) y de la superficie trasera de la lente (Fig. 3b) de una forma de realización de la LIO según la invención en un plano;

Fig. 4: proyección esquemática de la superficie tórica de un ejemplo de realización de la LIO según la invención, con un meridiano (intermedio) en función de un ángulo  $\alpha$ ;

Fig. 5: gráfico que incluye tres funciones para el radio de curvatura de la superficie tórica del ejemplo de realización de la Fig. 4 en función del ángulo  $\alpha$ ; y

40 Fig. 6: alzado de la superficie anterior (Fig. 6a) y alzado de la superficie posterior correspondiente (Fig. 6b) de la superficie tórica de un ejemplo de realización de la LIO según la invención, cuyo meridiano principal con menor capacidad de refracción forma un ángulo  $\chi$  diferente de  $90^\circ$  con el meridiano principal de mayor capacidad de refracción.

45 Si en una lente tórica se combina una superficie tórica, por ejemplo la superficie frontal, con una superficie esférica, por ejemplo la superficie posterior, la proyección de dicha superficie (frontal) tórica en un plano consiste en una elipse con los ejes 1 y 2 según la Fig. 1a. La longitud del eje mayor 1 de la elipse se designa  $a_m$ , la longitud del eje menor 2 de la elipse se designa  $b_m$ . Además, el radio de curvatura de la superficie tórica en el meridiano principal 1 se designa  $R1_m$  y el radio de curvatura del meridiano principal 2 se designa  $R2_m$ . El radio de la superficie (posterior) esférica de la lente tórica se designa  $R_s$ . La capacidad de refracción D1 en el meridiano principal 1 de la lente se puede expresar de la siguiente manera:

$$D1 = \frac{n_L - n_{imm}}{R1_m} + \frac{n_L - n_{imm}}{R_s} - \frac{t(n_L - n_{imm})^2}{n_L R1_m R_s} \quad (1)$$

donde

$n_L$  es el índice de la lente

$n_{imm}$  es el índice del medio que rodea la lente

5  $t$  es el grosor medio de la lente

En la ecuación (1), los radios tienen un valor positivo si son convexos para la luz que incide o incidiría desde fuera sobre la superficie de la lente en cuestión. Por consiguiente, en caso de una lente biconvexa, tanto  $R1_m$  como  $R_s$  son positivos.

Del mismo modo, la capacidad de refracción D2 en el meridiano principal 2 de la lente se puede expresar de la siguiente manera:

$$D2 = \frac{n_L - n_{imm}}{R2_m} + \frac{n_L - n_{imm}}{R_s} - \frac{t(n_L - n_{imm})^2}{n_L R2_m R_s} \quad (2)$$

10

El cilindro Z de la lente tórica se puede expresar, en una muy buena aproximación, de la siguiente manera:

$$Z = D2 - D1 \approx \frac{n_L - n_{imm}}{R2_m} - \frac{n_L - n_{imm}}{R1_m} \quad (3)$$

15

dado que la diferencia de los terceros miembros de las ecuaciones (1) y (2) es sumamente pequeña. Debido a que los terceros miembros (que sólo representan un factor de corrección para el espesor medio de la lente) de las ecuaciones (1) y (2) son pequeños con respecto a los otros, no se tienen en cuenta en las siguientes consideraciones fundamentales.

20

En cambio, si una lente según la invención se configura de modo que tanto la superficie frontal como la superficie posterior son tóricas, con el mismo efecto cilíndrico de la lente las longitudes  $b_b$  de los ejes de la elipse de las dos superficies tóricas son mayores que  $b_m$ , es decir la superficie óptica activa es mayor que la de una lente tórica convencional con una sola superficie tórica y una superficie de refracción esférica. Tomemos como ejemplo que el efecto cilíndrico de la lente se reparta a partes iguales entre la superficie anterior y la posterior. Entonces cada una de estas superficies presenta el cilindro Z/2. El radio en el meridiano principal de menor capacidad de refracción es  $R1_b$  y, sin pérdida de la generalidad, se supone que  $R1_b = R1_m$ . Entonces el radio  $R2_b$  en el meridiano principal de mayor capacidad de refracción se determina, en una muy buena aproximación, mediante la siguiente ecuación:

25

$$\frac{Z}{2} \approx \frac{n_L - n_{imm}}{R2_b} - \frac{n_L - n_{imm}}{R1_m} \quad (4)$$

La combinación de las ecuaciones (3) y (4) y la solución según  $R2_b$  da como resultado:

$$R2_b = \frac{2R1_m R2_m}{R1_m + R2_m} > R2_m \quad (5)$$

dado que  $R2_m < R1_m$ .

30

En las Fig. 3a y 3b se muestran esquemáticamente las relaciones. La Fig. 3a es la proyección de la superficie frontal de la lente sobre un plano y la Figura 3b es la proyección de la superficie posterior de la lente según la invención sobre un

plano. En esta figura, 1 es el meridiano principal de menor capacidad de refracción, 2 es el meridiano principal de mayor capacidad de refracción de una lente tórica que tiene como segunda superficie refractiva una superficie esférica y 10 es el meridiano principal de una lente tórica que tiene dos superficies de refracción tórica simétricas del mismo tipo; las dos lentes presentan el mismo cilindro. El eje de elipse mayor en el meridiano principal 1 de menor capacidad de refracción es  $a_m$  en el caso de la lente con una única superficie de refracción tórica y  $a_b$  en el caso de la lente con dos superficies tóricas. Este eje de elipse es idéntico en ambos casos, es decir  $a_b = a_m$ . El eje de elipse menor en el meridiano principal 2 de mayor capacidad de refracción de la lente con una única superficie tórica es  $b_m$ , el eje de elipse menor en el meridiano principal 10 de mayor capacidad de refracción de la lente con dos superficies tóricas es  $b_b$ . Es evidente que la superficie óptica eficaz de la lente con dos superficies tóricas es mayor que la de la lente que tiene una sola superficie tórica y una superficie esférica.

La división del cilindro en partes iguales en la cara anterior y posterior de una lente según la invención es arbitraria; evidentemente también son posibles otras divisiones de dicho cilindro.

Para ilustrarlo se toman como ejemplo los resultados de lentes con una mínima capacidad de refracción de 10 dioptrías y un cilindro de +6 dioptrías. La lente está hecha de un material con un índice de refracción  $n_L = 1,49$  y se encuentra en un medio con un índice de refracción  $n_{imm} = 1,336$ . El eje de la elipse mayor (para la menor capacidad de refracción de 10 dioptrías) tiene una longitud de 10 mm. Para el eje de elipse menor de una lente con una sola superficie tórica y una superficie de refracción esférica se obtiene el valor 6,03 mm; para el eje de elipse menor de la lente con dos superficies tóricas simétricas se obtiene el valor 7,9 mm.

Estas consideraciones son válidas para lentes tóricas cuyas curvas de intersección en los meridianos principales están determinadas por ecuaciones de círculo como caso excepcional.

Para transformar frentes de onda producidos por la refracción de una onda plana en una superficie astigmática o tórica en ondas esféricas puede ser necesario utilizar lentes astigmáticas cuyas curvas de intersección en los meridianos principales estén determinadas por ecuaciones esféricas. Por ello, de acuerdo con la invención algunas lentes astigmáticas presentan en los meridianos principales curvas determinadas por ecuaciones esféricas. En estas lentes según la invención, las ecuaciones de las curvas en los meridianos principales de la o las superficies refractivas están determinadas por las ecuaciones de vértice de asferas. Estas ecuaciones de vértice presentan la siguiente forma

$$y = \sqrt{2Rx - (1 + asp)x^2} \quad (6)$$

donde

$R$  es el radio o parámetro en el ápex de la lente,

$asp$  es la asfericidad de la asfera.

El radio  $R$  está determinado correspondientemente por  $R1_m$  o  $R2_m$  o  $R1_b$  o  $R2_b$ , ya que en el caso de los rayos de luz cercanos al eje, esto es dentro del área de la óptica de Gauss, las leyes de refracción en lentes para superficies esféricas y esféricas con el mismo radio o parámetro son prácticamente iguales.

Las asfericidades en los dos meridianos principales pueden ser diferentes. Si llamamos  $asp1$  a la asfericidad en el meridiano principal 1 y  $asp2$  a la asfericidad en el meridiano principal 2, se pueden dar los siguientes casos:

$$asp1 = asp2 \quad (7)$$

o

$$asp1 \neq asp2 \quad (7')$$

Los valores adecuados para  $asp1$  y  $asp2$  dependen de la forma de la onda que se produce por la refracción de una onda plana en una superficie de refracción astigmática.

En determinados casos de aplicación puede ser necesario prever en los meridianos principales curvas de intersección con una superficie refractiva de lente según la invención que no puedan representarse mediante la ecuación de vértice de una asfera simple según la ecuación (6), es decir, mediante la ecuación de una sección cónica. En este caso resulta conveniente elegir otra forma de representación para esta curva de intersección, que se obtiene resolviendo la ecuación (6) y añadiendo una serie de potencias:

$$x = \frac{y^2 / R}{1 + \sqrt{1 - (1 + asp)y^2 / R^2}} + \sum_j c_j y^j \quad (8)$$

siendo  $c_j$  los coeficientes polinómicos.

Si se elige una forma de representación de la asfera según la ecuación (8), en cada uno de los meridianos principales además de la asfericidad también se han de calcular los valores para los coeficientes  $c_j$ . En general, debido a la monotonía usual de la curva de la ecuación (8), en dicha ecuación (8) sólo se tienen en cuenta los términos pares.

Las consideraciones generales válidas para las lentes según la invención con ecuaciones esféricas en las curvas de intersección de los meridianos principales de la o las superficies refractivas según la ecuación (7) también son válidas *mutatis mutandi* para las lentes según la invención con ecuaciones esféricas en las curvas de intersección correspondientes según la ecuación (8).

En general, la elección de los diferentes parámetros  $R$  y  $asp$  en los meridianos de una o de las dos superficies tóricas o astigmáticas o de la superficie esférica de una lente tórica depende de la onda incidente que deba ser transformada en una onda esférica por esta lente. La determinación de los valores para los dos radios o parámetros y las dos asfericidades en los meridianos principales de la lente se puede llevar a cabo mediante procedimientos iterativos asistidos por ordenador en los que todos los rayos de luz considerados son refractados en las superficies presentes. Estos procedimientos requieren la representación tridimensional analítica de todas las superficies refractivas en el sistema de lentes, el cálculo de los vectores normales en posiciones aleatorias sobre estas superficies (formación de gradientes) y la ley de refracción tridimensional en forma vectorial. Estos procedimientos son de claro entendimiento para los especialistas; no constituyen ningún objeto de la presente invención. Además, la patente de W. Fiala y col., PCT/EP2004/006074 (publicada como WO 2004/108017) da a conocer directrices generales para la elección adecuada de estos parámetros.

Por consiguiente, en los meridianos principales de la o las superficies refractivas, la lente según la invención presenta curvas que se pueden representar analíticamente mediante las ecuaciones de vértice de asferas según la ecuación (6) o la ecuación (8). Es decir, las curvas de intersección de planos con ejes paralelos en los meridianos principales son asferas con un parámetro o radio  $R$  y una asfericidad  $asp$  en el caso de la representación según la ecuación (6) y adicionalmente con el coeficiente  $c_j$  en el caso de la representación según la ecuación (8).

Las curvas de intersección de planos con ejes paralelos en los meridianos principales se pueden representar como una función de los parámetros o radios y de las asfericidades en los meridianos principales y del ángulo entre el meridiano en cuestión y uno de los meridianos principales. En la Fig. 4 se muestran las relaciones. El meridiano principal de menor capacidad de refracción está indicado de nuevo con el número 1, el meridiano principal con mayor capacidad de refracción está indicado con el número 2. Un meridiano 14 forma un ángulo  $\alpha$  con el meridiano principal 1. El radio o parámetro en este meridiano se designa  $R_\alpha$ .

Para el radio o parámetro  $R_\alpha$  es aplicable en general:

$$R_\alpha = f(\alpha) \quad (9)$$

con las siguientes condiciones límite:

$$f(0) = f(180^\circ) = R1$$

$$f(90^\circ) = f(270^\circ) = R2 \quad (10)$$

$$f'(\alpha) < 0, \text{ si } 0 < \alpha < 90^\circ \text{ y } 180^\circ < \alpha < 270^\circ$$

$$f'(\alpha) > 0, \text{ si } 90^\circ < \alpha < 180^\circ \text{ y } 270^\circ < \alpha < 360^\circ$$

es decir, debido a  $R1 > R2$ , esta función ha de disminuir monótonamente entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  y entre  $180^\circ$  y  $270^\circ$ , y ha de aumentar monótonamente entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$  y entre  $270^\circ$  y  $360^\circ$ . Es evidente que para  $f(\alpha)$  existen numerosas funciones. La función  $f(\alpha)$  más adecuada sólo se puede determinar una vez conocido el frente de onda que incide sobre la lente y que ha de ser transformado en un frente de onda esférico mediante la lente según la invención. En general, para determinar la función  $f(\alpha)$  óptima es necesario probar diferentes planteamientos matemáticos para  $f(\alpha)$ .

Únicamente como ejemplos de planteamientos válidos para la función  $f(\alpha)$  se mencionan:

$$R_\alpha = f_1(\alpha) = R1 \times \cos^2 \alpha + R2 \times \sin^2 \alpha \quad (11)$$

o

$$R_{\alpha} = f_2(\alpha) = \sqrt{R1^2 \times \cos^2 \alpha + R2^2 \times \sin^2 \alpha} \quad (12)$$

o

$$R_{\alpha} = f_3(\alpha) = \frac{1}{\frac{1}{R1} \cos^2 \alpha + \frac{1}{R2} \sin^2 \alpha} \quad (13)$$

5

En la Fig. 5 están representadas a modo de ejemplo las tres funciones arriba mostradas para los valores R1 = 10 y R2 = 6 como planteamientos válidos de  $f(\alpha)$ . Para  $f(\alpha)$  son posibles otras innumerables funciones.

Las asfericidades en los meridianos principales 1 y 2 son diferentes en la mayoría de los casos, pero también pueden ser iguales. En todo caso, el valor de la asfericidad  $asp_{\alpha}$  en el meridiano 14 se puede plantear de nuevo como una función de las dos asfericidades  $asp1$  y  $asp2$  en los meridianos principales y del ángulo  $\alpha$ . En este contexto se pueden utilizar funciones del mismo tipo que la función  $f_i(\alpha)$  recién mencionada u otras funciones  $g(\alpha)$ .

Si designamos en general la función para el parámetro  $R_{\alpha}$  como  $f(\alpha, R1, R2)$  y la función para la asfericidad  $asp_{\alpha}$  de la superficie de lente astigmática como  $g(\alpha, asp1, asp2)$ , la superficie astigmática (sin términos de orden superior) se puede representar de la siguiente manera:

$$y^2 + z^2 = 2R_{\alpha}x - (1 + asp_{\alpha})x^2 \quad (14)$$

15

La ecuación (14) también se puede representar como:

$$F(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - 2R_{\alpha}x + asp_{\alpha}x^2 = 0 \quad (14')$$

con

$$R_{\alpha} = f(\alpha, R1, R2) \text{ y } asp_{\alpha} = g(\alpha, asp1, asp2) \quad (15)$$

20 Si el meridiano principal se encuentra en el plano XY, siendo X el eje de la lente,  $\alpha$  se puede representar de la siguiente manera:

$$\alpha = \arctan(z/y) \quad (16)$$

y sustituyendo la ecuación (16) en la ecuación (14') se obtiene la representación de la superficie refractiva astigmática de una lente según la invención en coordenadas cartesianas.

25 Como ejemplo se muestra la ecuación de una superficie astigmática donde tanto el parámetro  $R_{\alpha}$  como la asfericidad  $asp_{\alpha}$  se representan mediante funciones de tipo  $f_i(\alpha)$ . Además, la dirección del meridiano principal 1 es la dirección "Y" y la dirección del meridiano principal 2 es la dirección "Z". Es decir:

$$R1 = R_{xy} \text{ y } asp1 = asp_{xy}$$

y

$$R2 = R_{xx} \text{ y } asp2 = asp_{xx}$$

30

De este modo, para la superficie astigmática de la lente según la invención se obtiene la expresión:

$$F(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 + \frac{y^2}{y^2 + z^2} asp_{xy} x^2 + \frac{z^2}{y^2 + z^2} asp_{xz} x^2 -$$

$$- 2 \frac{y^2}{y^2 + z^2} R_{xy} x - 2 \frac{z^2}{y^2 + z^2} R_{xz} x = 0 \quad (17)$$

Por último también se analiza el caso donde los meridianos principales de una superficie refractiva astigmática no son ortogonales entre sí.

5 La Fig. 6a muestra una vista frontal (alzado) de la superficie astigmática de una lente astigmática. La Fig. 6b muestra el alzado de la superficie posterior correspondiente de dicha lente astigmática.

10 Por tanto, el ángulo entre los meridianos principales 1 y 15 (Fig. 6a o 6b) no es un ángulo de 90°, sino un ángulo  $\chi$ . Los parámetros en los meridianos principales son de nuevo R1 y asp1 o R2 y asp2. En este caso, los parámetros  $R_\alpha$  y  $asp_\alpha$  para los meridianos entre los meridianos principales no ortogonales se pueden representar análogamente, tal como se muestra más arriba. Sin embargo, en las ecuaciones (15) el argumento angular  $\alpha$  se ha de sustituir por  $\alpha'$ , representándose la relación entre estos valores mediante las siguientes ecuaciones:

$$\alpha' = 90 \frac{\alpha}{\chi} \quad \text{si für } 0 \leq \alpha \leq \chi$$

$$\alpha' = 90 \frac{180 - 2\chi + \alpha}{180 - \chi} \quad \text{si für } \chi \leq \alpha \leq 180$$

$$\alpha' = 180 + 90 \frac{\alpha - 180}{\chi} \quad \text{si für } 180 \leq \alpha \leq 180 + \chi$$

$$\alpha' = 180 + 90 \frac{\alpha - 2\chi}{180 - \chi} \quad \text{si für } 180 + \chi \leq \alpha \leq 360$$

(18)

La Fig. 7 muestra la relación entre  $\alpha$  y  $\alpha'$  en caso de un ángulo  $\chi = 120^\circ$ .

15 Las relaciones según la ecuación (18) son lineales. Evidentemente, la relación entre  $\alpha$  y  $\alpha'$  se puede establecer mediante otras funciones no lineales  $\alpha' = h(\alpha)$ . No obstante, la función  $h(\alpha)$  ha de presentar una monotonía creciente para valores crecientes de  $\alpha$ . Además,  $h(\alpha)$  ha de dar el valor  $\alpha' = 90^\circ$  para  $\alpha = \chi$ , o en general los valores  $\alpha' = 0, 90, 180, 270$  y  $360^\circ$  para ángulos  $\alpha$  que coinciden con los ángulos de los meridianos principales ( $0, \chi, 180^\circ, 180^\circ + \chi, 360^\circ$ ).

20 Las lentes según la invención con superficies refractivas astigmáticas del tipo arriba descrito son considerablemente más adecuadas para la transformación de frentes de onda producidos por la refracción en superficies refractivas sin simetría de rotación en frentes de onda esféricos que las lentes tóricas convencionales con una superficie refractiva tórica y una superficie refractiva esférica.

**REIVINDICACIONES**

1. Lente intraocular con al menos una superficie de lente de refracción tórica para corregir una ametropía astigmática tanto en la cara anterior de la lente como en la cara posterior de la lente, caracterizada porque las curvas de intersección de la superficie de lente de refracción tórica en los dos meridianos principales en planos paralelos al eje de la lente están descritas en cada caso mediante una asfera según la ecuación

$$y = \sqrt{2Rx - (1 + asp)x^2}$$

o

$$x = \frac{y^2 / R}{1 + \sqrt{1 - (1 + asp)y^2 / R^2}} + \sum_j c_j y^j$$

donde

- 10 R es el radio o parámetro en el ápex de la lente,  
 asp es la asfericidad de la asfera, y  
 c<sub>j</sub> son coeficientes polinómicos.
2. Lente intraocular según la reivindicación 1, caracterizada porque la superficie anterior y la posterior tienen forma convexa.
- 15 3. Lente intraocular según la reivindicación 1 o 2, caracterizada porque el efecto cilíndrico está repartido de modo aproximadamente uniforme entre la superficie anterior y la superficie posterior.
4. Lente intraocular según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizada porque la lente intraocular presenta una superficie de lente de refracción tórica con dos meridianos principales que delimitan un ángulo entre ellos diferente de 90°.

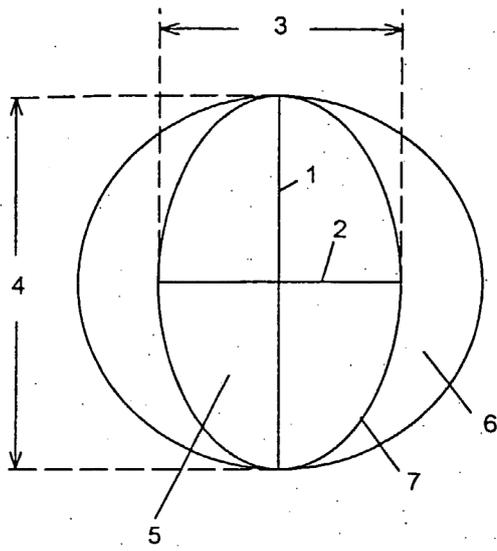


Fig. 1a

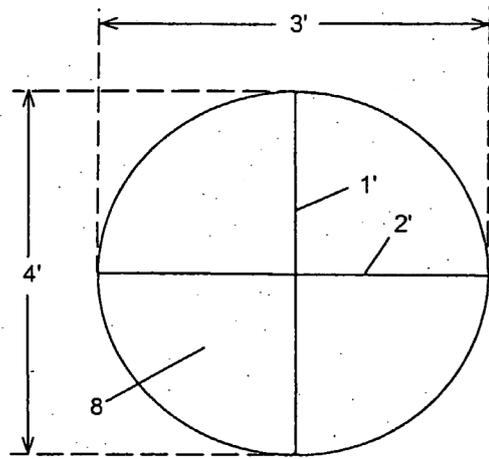


Fig. 1b

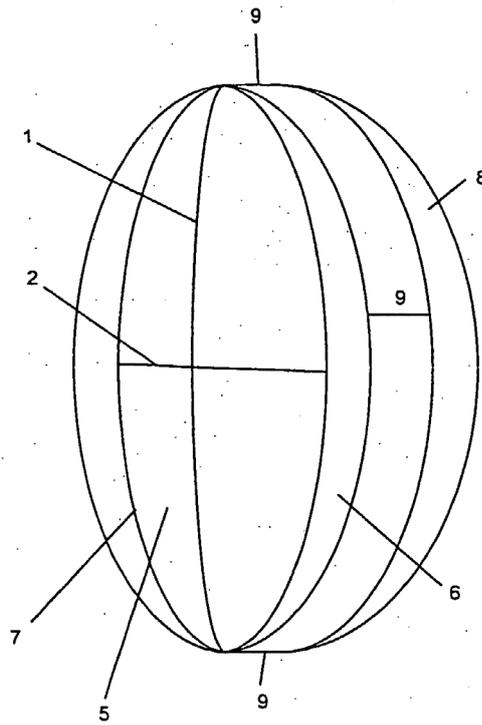


Fig. 2

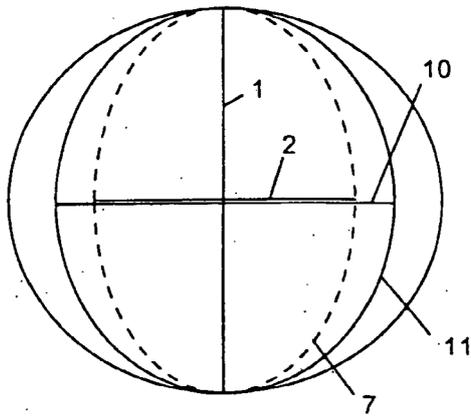


Fig. 3a

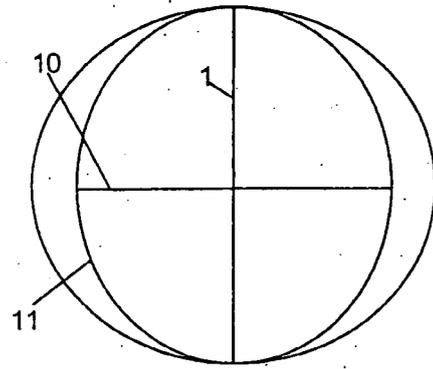


Fig. 3b

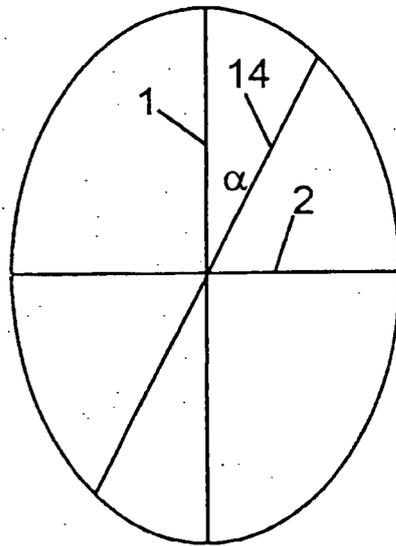
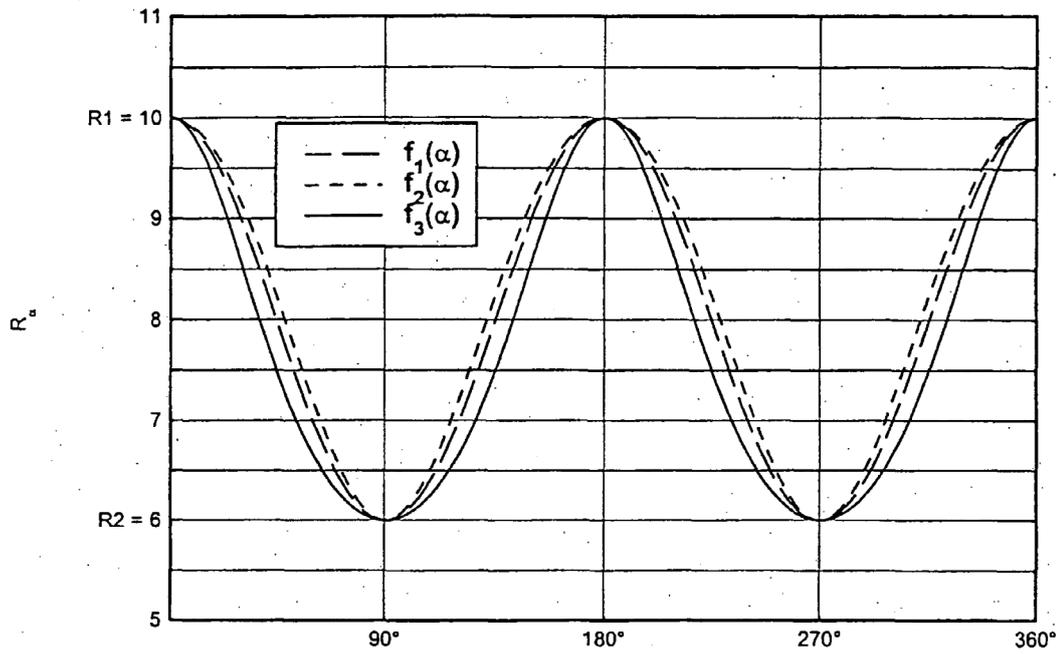


Fig. 4



Ángulo  $\alpha$  entre el meridiano 14 y el meridiano 1 en la Fig. 4

Fig. 5

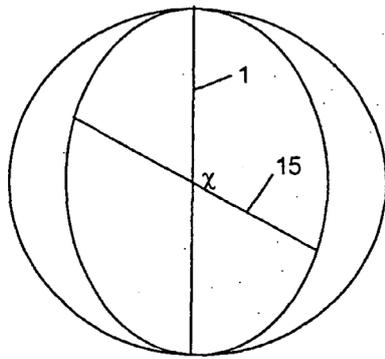


Fig. 6a (superficie frontal)

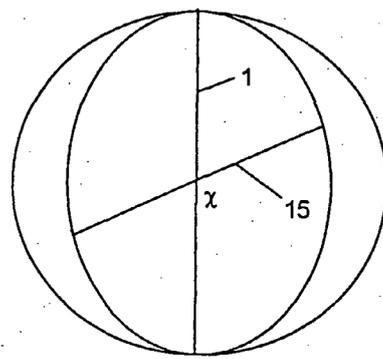


Fig. 6b (superficie posterior)

Ángulo entre los meridianos principales:  $\chi = 120$  grados

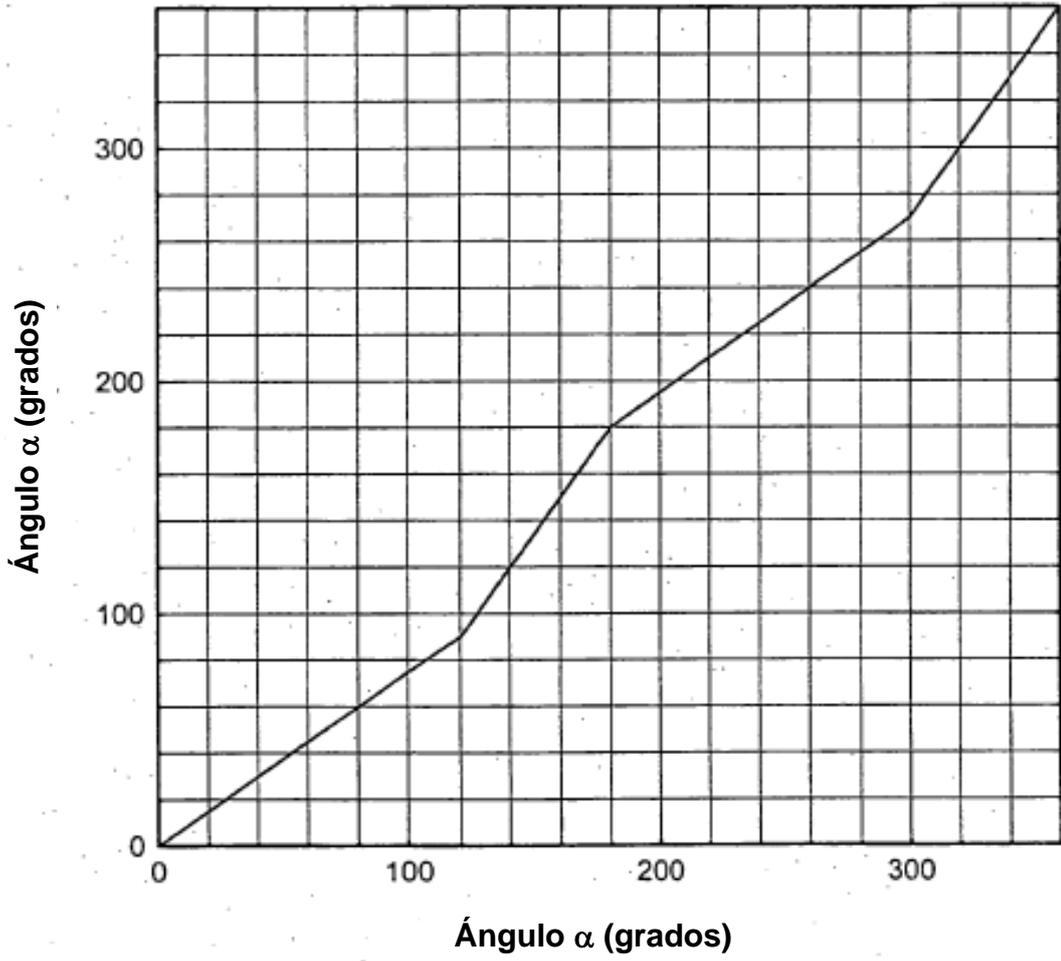


Fig. 7