

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 415 629**

51 Int. Cl.:

G02C 7/06 (2006.01)

A61F 2/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.02.2007** **E 07763243 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.04.2013** **EP 1982230**

54 Título: **IOL pseudoacomodativa con múltiples patrones difractivos**

30 Prioridad:

09.02.2006 US 350505

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

26.07.2013

73 Titular/es:

**ALCON RESEARCH, LTD. (100.0%)
6201 SOUTH FREEWAY
FORT WORTH, TX TEXAS 76134, US**

72 Inventor/es:

**HONG, XIN;
VAN NOY, STEPHEN, J. y
ZHANG, XIAOXIAO**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 415 629 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

IOL pseudoacomodativa con múltiples patrones difractivos.

5 Antecedentes

La presente invención se refiere en general a lentes oftálmicas multifocales y, más particularmente, a lentes oftálmicas trifocales, tales como lentes intraoculares trifocales (IOL).

10 Una pluralidad de lentes oftálmicas está disponible para corregir desórdenes visuales, tales como cataratas, miopía, hipermetropía o astigmatismo. Por ejemplo, una lente intraocular (IOL) puede implantarse en el ojo de un paciente durante la cirugía de cataratas para compensar la potencia óptica perdida del cristalino natural retirado. Aunque facilitan la potencia óptica requerida, las IOL no proporcionan la acomodación (es decir, la capacidad de enfocar sobre objetos a distancias variables) que puede lograrse por un cristalino natural. Sin embargo, se conocen IOL multifocales que pueden proporcionar un cierto grado de acomodación (conocida también como pseudoacomodación). Por ejemplo, están disponibles IOL difractivas bifocales que son capaces de proporcionar un foco de cerca y un foco de lejos.

20 Se conocen también lentes oftálmicas trifocales para proporcionar un foco de cerca y un foco de lejos, así como un foco intermedio. Sin embargo, tales lentes trifocales convencionales adolecen de una serie de inconvenientes. Por ejemplo, proporcionan visión intermedia a expensas de la degradación de la visión de lejos y/o de cerca.

25 En consecuencia, existe una necesidad de lentes oftálmicas multifocales mejoradas y, particularmente, lentes oftálmicas trifocales. Hay también una necesidad de tales lentes multifocales en forma de lentes intraoculares (IOL) que puedan implantarse en los ojos de un paciente, por ejemplo, para sustituir al cristalino natural.

La técnica anterior está representada por el documento EP-A1-0.343.067 (Essilor).

30 Sumario

La presente invención se refiere en general a lentes oftálmicas multifocales, tales como lentes intraoculares trifocales (IOL) que proporcionan visión de cerca y de lejos, así como visión intermedia de acuerdo con las reivindicaciones que siguen. Las lentes oftálmicas de la invención utilizan estructuras difractivas para dirigir luz incidente a tres regiones focales correspondientes a visión de cerca, intermedia y de lejos. En algunos casos, las lentes oftálmicas incluyen al menos dos patrones difractivos diferentes, presentando uno principalmente dos focos y el otro principalmente tres focos, de tal manera que, colectivamente, acomoden la visión de cerca, intermedia y de lejos. En otros casos, las lentes oftálmicas incluyen dos patrones difractivos diferentes, proporcionando ambos principalmente dos focos, pero a diferentes potencias de adición seleccionadas de tal modo que los patrones proporcionen colectivamente visión de cerca, intermedia y de lejos.

40 En un aspecto, se describe una lente oftálmica trifocal que incluye una óptica que tiene una superficie que comprende al menos un patrón difractivo trifocal y al menos un patrón difractivo bifocal, de tal manera que el patrón bifocal proporcione visión de cerca y de lejos y el patrón trifocal genere visión de cerca, de lejos e intermedia. Por ejemplo, el patrón trifocal puede proporcionar focos de cerca, de lejos e intermedio, de tal manera que los focos de cerca y de lejos sean sustancialmente coincidentes, respectivamente, con un foco de cerca y un foco de lejos del patrón bifocal. De esta manera, los patrones trifocal y bifocal proporcionan colectivamente focos (o regiones focales) de cerca, intermedio y de lejos correspondientes, respectivamente, a las visiones de cerca, intermedia y de lejos. Los términos "focos" y "regiones focales" se utilizan intercambiamente aquí en su sentido general para identificar regiones espaciales en las que se mejora la agudeza visual (por ejemplo, resolución de imagen). El término "patrón difractivo bifocal", como se utiliza aquí, se refiere a estructuras difractivas que difractan la luz incidente principalmente en dos órdenes de difracción (por ejemplo, 60% o más de la energía luminosa se dirige a esos dos órdenes de difracción). Además, el término "patrón difractivo trifocal", como se utiliza aquí, se refiere a estructuras difractivas que difractan luz incidente principalmente en tres órdenes de difracción (por ejemplo, 60% o más de la energía luminosa se dirige a esos tres órdenes de difracción).

55 En un aspecto relacionado, la superficie de la óptica que comprende los patrones difractivos puede caracterizarse por una curva de referencia de base adaptada para proporcionar una potencia refractiva correspondiente al foco de lejos. En muchas formas de realización de la invención, el foco de lejos proporciona una potencia óptica en un rango comprendido entre aproximadamente 6 y aproximadamente 34 dioptrías, proporcionando el foco intermedio una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 1,5 y aproximadamente 4,5 dioptrías, y proporcionando el foco de cerca una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 3 y aproximadamente 9 dioptrías.

65 En otro aspecto, los patrones difractivos están dispuestos dentro de una parte de la superficie rodeada por una parte periférica de esa superficie que está sustancialmente desprovista de estructuras difractivas. En otras palabras, las estructuras difractivas están truncadas de modo que una parte periférica de la superficie proporcione una potencia

puramente refractiva.

5 En otro aspecto, el patrón difractivo trifocal puede disponerse más cerca de un eje óptico de la óptica que el patrón bifocal. A modo de ejemplo, el patrón difractivo trifocal puede comprender una pluralidad de estructuras difractivas anulares que se extienden desde un eje óptico de la óptica hasta un radio correspondiente a un radio de apertura (pupila) en un rango comprendido entre aproximadamente 1 y aproximadamente 1,5 milímetros (es decir, un diámetro de apertura en un rango comprendido entre aproximadamente 2 y aproximadamente 3 mm). El patrón bifocal puede estar formado como una pluralidad de estructuras difractivas anulares que rodean el patrón trifocal. De esta manera, el patrón trifocal se emplea como el patrón difractivo primario para aperturas pequeñas, aumentando la contribución difractiva del patrón bifocal cuando aumenta el tamaño de la apertura.

15 En un aspecto relacionado, las estructuras difractivas bifocales anulares exhiben una altura de escalón decreciente en sus límites en función de la distancia creciente desde el eje óptico. La reducción en las alturas de escalón puede caracterizarse por una función de apodización. Sigue un ejemplo de tal función de apodización (los que tengan conocimientos ordinarios en la materia apreciarán que pueden utilizarse también otras funciones):

$$f_{\text{apodizar}} = 1 - \left(\frac{r_i}{r_{\text{ext}}}\right)^3,$$

en la que

20 r_i denota la distancia radial de la i -ésima zona,

r_{ext} denota el radio exterior de la última zona difractiva bifocal.

25 En otro aspecto, las estructuras difractivas que forman el patrón trifocal se conforman de manera diferente a las que forman el patrón bifocal. A modo de ejemplo, el patrón difractivo trifocal puede comprender uno o más escalones sustancialmente cuadrados mientras que el patrón difractivo bifocal comprende uno o más escalones sustancialmente en forma de dientes de sierra.

30 En otros aspectos, la invención proporciona una lente oftálmica trifocal que comprende una óptica que tiene al menos una superficie con un perfil de referencia caracterizado por una curva de base y al menos dos patrones difractivos anulares superpuestos sobre esa curva de base. Uno de los patrones proporciona principalmente tres focos mientras que el otro proporciona principalmente dos focos, de tal manera que una combinación de distribución de energía asociada con los focos de un patrón con la del otro patrón da como resultado la acomodación de visión de cerca, intermedia y de lejos. Además, la curva de base puede adaptarse para proporcionar una potencia refractiva correspondiente a la visión de lejos.

40 En un aspecto relacionado, una parte periférica de la óptica que está desprovista sustancialmente de estructuras difractivas rodea los patrones difractivos. En algunos casos, el patrón difractivo que proporciona tres focos está dispuesto más cerca de un eje óptico de la óptica que el patrón que proporciona dos focos. A modo de ejemplo, el patrón difractivo que proporciona tres focos puede comprender una pluralidad de zonas difractivas anulares que se extienden desde un eje óptico de la óptica hasta una primera distancia desde ese eje, y el patrón difractivo que proporciona dos focos puede comprender una pluralidad de zonas difractivas anulares que se extienden desde esa primera distancia hasta una segunda distancia desde el eje óptico, que es menor que un radio de la óptica.

45 En otro aspecto, la curva de base que caracteriza el perfil de referencia de la superficie sobre el cual están dispuestos los patrones difractivos es esférica para reducir la aberración esférica, particularmente en el foco de lejos para grandes aperturas.

50 En otro aspecto, se describe una lente oftálmica multifocal que incluye una óptica que tiene una superficie que comprende dos patrones bifocales independientes, en donde los patrones exhiben diferentes potencias de adición para proporcionar cooperativamente visión de cerca, intermedia y de lejos. Por ejemplo, uno de los patrones puede proporcionar una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 1,5 y aproximadamente 4,5 dioptrías mientras que el otro proporciona una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 3 y aproximadamente 9 dioptrías.

55 En un aspecto relacionado, uno de los patrones bifocales puede disponerse más cerca de un eje óptico de la óptica que el otro. Por ejemplo, los patrones pueden tener la forma de zonas difractivas concéntricas dispuestas alrededor del eje óptico, extendiéndose las zonas correspondientes a un patrón desde el eje óptico en una distancia radial seleccionada y extendiéndose las zonas correspondientes al otro patrón desde esa distancia radial hasta una distancia mayor, que se selecciona en muchas formas de realización para que sea menor que un radio de la óptica.

60 Puede obtenerse una comprensión adicional de la invención por referencia a la siguiente descripción detallada en conjunción con las figuras asociadas, que se describen brevemente a continuación.

Breve descripción de los dibujos

- 5 La figura 1A es una vista en sección transversal esquemática de una lente oftálmica trifocal según una realización de la invención,
- La figura 1B es una vista en sección transversal esquemática de una superficie anterior de una óptica de la lente de la figura 1A que comprende una pluralidad de estructuras difractivas superpuestas sobre un perfil de base,
- 10 La figura 2 es una vista frontal de la lente difractiva de las figuras previas que representa una pluralidad de zonas anulares formadas por las estructuras difractivas,
- La figura 3 muestra un ejemplo de distribución de potencia óptica en las regiones focales de cerca, intermedia y de lejos de una lente oftálmica trifocal según una realización de la invención,
- 15 La figura 4A representa esquemáticamente el foco de luz que emana desde un objeto de cerca, intermedio y de lejos sobre la retina de un ojo en el que se implanta una lente IOL trifocal según una realización de la invención,
- La figura 4B es una vista frontal esquemática de una lente oftálmica trifocal según otra realización de la invención que tiene patrones difractivos bifocales interior y exterior con diferentes potencias de adición seleccionadas de tal manera que los patrones proporcionen colectivamente visión de cerca, intermedia y de lejos,
- 20 La figura 4C representa esquemáticamente perfiles de energía óptica en focos de cerca y de lejos de patrones bifocales individuales de la lente mostrada en la figura 4B, así como los perfiles de energía en focos de cerca, intermedio y de lejos proporcionados colectivamente por los patrones combinados,
- 25 La figura 5A es una vista en sección transversal esquemática de una lente oftálmica trifocal según otra realización de la invención que tiene zonas difractivas con áreas desiguales,
- La figura 5B es una vista frontal de la lente oftálmica de la figura 5A,
- 30 La figura 6 presenta dos gráficos esquemáticos que contrastan relaciones entre los radios al cuadrado de las zonas difractivas de dos lentes difractivas, en una de las cuales las zonas difractivas exhiben áreas uniformes y en la otra presentan áreas no uniformes,
- 35 La figura 7 presenta dos gráficos esquemáticos que ilustran la mejora de agudeza visual para visión intermedia proporcionada por una lente oftálmica trifocal según una realización de la invención,
- La figura 8 representa esquemáticamente el retardo de fase óptica (OPD) asociado con tres órdenes de difracción de una lente oftálmica difractiva multifocal a través de dos órdenes difractivos en función de la distancia radial cuadrada desde el eje óptico de la lente.
- 40

Descripción detallada

- 45 La presente invención se dirige en general a lentes oftálmicas trifocales, tales como lentes intraoculares, que proporcionan visión de cerca, intermedia y de lejos. Las lentes oftálmicas trifocales de la invención proporcionan ventajosamente prestaciones visuales mejoradas para la visión intermedia con relación a la típicamente obtenida por lentes trifocales convencionales, mientras se mantienen, y en muchos casos se exceden, las prestaciones visuales de cerca y de lejos de tales lentes convencionales. En formas de realización discutidas a continuación, se describen diversos aspectos de lentes trifocales de la invención en conexión con lentes intraoculares. Sin embargo, deberá entenderse que los principios de la invención pueden aplicarse análogamente a la fabricación de otras lentes oftálmicas, tales como lentes de contacto.
- 50
- Con referencia a las figuras 1A y 1B, una lente oftálmica trifocal 10 según una realización de la invención, incluye una óptica 12 que tiene una superficie óptica anterior 14 y una superficie óptica posterior 16. En esta realización, las superficies ópticas anterior y posterior están dispuestas simétricamente alrededor de un eje óptico 18 de la lente, aunque pueden emplearse también superficies asimétricas. El ejemplo de lente 10 incluye también miembros o hápticas 20 de fijación que se extienden radialmente para su colocación en el ojo de un paciente. La óptica 12 puede formarse de cualquier material biocompatible adecuado. Algunos ejemplos de tales materiales incluyen, sin limitación, acrílico blando, silicona, hidrogel u otros materiales poliméricos biocompatibles que tengan un índice requerido de refracción para una aplicación particular de la lente. Los miembros de fijación 20 pueden formarse también de materiales poliméricos adecuados, tales como polimetilmetacrilato, polipropileno y similares. Aunque las superficies 14 y 16 están representadas como generalmente convexas, ambas superficies pueden tener una forma generalmente cóncava. Alternativamente, las superficies 14 y 16 pueden seleccionarse para proporcionar una lente planoconvexa o planocóncava. Los términos "lente intraocular" y su abreviatura "IOL" se utilizan aquí de manera intercambiable para describir lentes que se implantan en el interior de un ojo para sustituir el cristalino natural del ojo o para aumentar de otra manera la visión con independencia de que se retire o no el cristalino natural.
- 55
- 60
- 65

La superficie anterior 14 está caracterizada por una curva de base 22 (representada por líneas de trazos) que proporciona una potencia refractiva seleccionada y sobre la cual se superpone una pluralidad de estructuras difractivas 24. Como se muestra esquemáticamente en la figura 2, las estructuras difractivas 24 pueden caracterizarse por formar una pluralidad de zonas difractivas anulares concéntricas 26 que difractan luz incidente en una pluralidad de órdenes difractivos de una manera discutida con más detalle a continuación. Las zonas difractivas 26 están confinadas dentro de una parte de la superficie que está rodeada por una parte periférica 28 que está desprovista de estructuras difractivas. En otras palabras, las zonas difractivas están truncadas de tal manera que la parte periférica de la superficie anterior proporcione una potencia puramente refractiva dictada por la curva de base. En esta realización, las zonas difractivas están caracterizadas por dos patrones difractivos, uno de los cuales se denomina aquí patrón trifocal y el otro patrón bifocal. Más específicamente, las zonas anulares 26a, 26b y 26c, que forman el patrón difractivo trifocal, dirigen cooperativamente la luz incidente principalmente en tres órdenes de difracción (denominados aquí órdenes de difracción "+1", "0" y "-1"). La luz dirigida al orden de difracción +1 converge para formar un foco de cerca, mientras que los haces luminosos dirigidos a órdenes de difracción 0 y -1 convergen para formar, respectivamente, un foco intermedio y un foco de lejos (distancia). Deberá apreciarse que las zonas difractivas que forman el patrón trifocal difractan también luz en órdenes más altos. Sin embargo, el patrón trifocal difracta un gran porcentaje de la luz incidente, por ejemplo, aproximadamente 60% o más, en los tres órdenes anteriores.

En este ejemplo de realización, unas zonas difractivas anulares 26d, 26e, 26f, 26g, 26h y 26i forman el patrón difractivo bifocal, que difracta la luz incidente principalmente en dos órdenes de difracción (por ejemplo, órdenes "0" y "+1"). La luz difractada en el 0^{ésimo} orden del patrón bifocal converge en un foco que es sustancialmente coincidente con el foco de distancia anterior generado por la convergencia de la luz difractada en el orden -1 del patrón trifocal. Y la luz difractada en el orden de difracción +1 del patrón bifocal converge en un foco que es sustancialmente coincidente con el foco de cerca anterior generado por convergencia de la luz difractada en el orden de difracción +1 del patrón trifocal. De manera similar al patrón trifocal, el patrón bifocal difracta también luz a órdenes más altos. Sin embargo, difracta el volumen de la energía óptica incidente, por ejemplo alrededor de 60% o más, en los órdenes 0 y -1 anteriores.

Además, el foco refractivo proporcionado por la curva de base de la superficie anterior corresponde sustancialmente al foco de lejos generado por los patrones difractivos. Es decir, la potencia refractiva de la lente contribuye a las prestaciones de la lente para visión de lejos.

Como se muestra esquemáticamente en la figura 1B, en este ejemplo de realización, las zonas difractivas trifocales están formadas por estructuras difractivas sustancialmente rectangulares (escalones) que están separadas una de otra en sus límites de zona por una altura de escalón sustancialmente uniforme. A modo de ejemplo, la altura de escalón en una longitud de onda de diseño puede definirse de acuerdo con la siguiente relación:

$$\text{Altura de escalón} = \frac{\lambda}{a(n_2 - n_1)} \quad \text{Ecuación (1).}$$

en la que

λ es la longitud de onda de diseño (por ejemplo, 550 nm),

a denota un parámetro que puede ajustarse para controlar la eficiencia de difracción asociada con diversos órdenes. A modo de ejemplo, a puede seleccionarse para ser 2,5,

n_2 es el índice de refracción de la óptica, y

n_1 denota el índice de refracción del medio que rodea la lente. En formas de realización en las que el medio circundante es el humor acuoso que tiene un índice de refracción de 1,336, el índice de refracción de la óptica (n_2) puede seleccionarse para ser 1,55. La altura de escalón proporcionada por la ecuación anterior es sólo un ejemplo y pueden utilizarse también otras alturas de escalón.

Por el contrario, las zonas difractivas bifocales en este ejemplo de realización se forman por una pluralidad de estructuras difractivas similares a dientes de sierra, que están separadas una de otra en sus respectivos límites de zona por alturas de escalón no uniformes. Más específicamente, las alturas de escalón en límites de zona del patrón bifocal se reducen progresivamente a medida que aumentan sus distancias desde el eje óptico. En otras palabras, las alturas de escalón en los límites de las estructuras difractivas bifocales se "apodizan" para modificar la fracción de la energía óptica difractada en los focos de cerca y de lejos en función del tamaño de apertura (por ejemplo, cuando aumenta el tamaño de apertura, se difracta más energía luminosa al foco de lejos). A modo de ejemplo, la altura de escalón en cada límite de zona del patrón difractivo bifocal puede definirse de acuerdo con la siguiente relación:

$$\text{Altura de escalón} = \frac{\lambda}{a(n_2 - n_1)} f_{\text{apodizar}} \quad \text{Ecuación (2).}$$

en la que

5 λ denota una longitud de onda de diseño (por ejemplo, 550 nm),

a denota un parámetro que puede ajustarse para controlar la eficiencia de difracción asociada con diversos órdenes, por ejemplo, a puede seleccionarse para ser 2,5,

10 n_2 denota el índice de refracción de la óptica,

n_1 denota el índice de refracción de un medio en el que se coloca la lente, y f_{apodizar} representa una función de escalado cuyo valor disminuye en función de la distancia radial creciente de la intersección del eje óptico con la superficie anterior de la lente. A modo de ejemplo, la función de escalado f_{apodizar} puede definirse por la siguiente relación:

$$f_{\text{apodizar}} = 1 - \left(\frac{r_i}{r_{\text{ext}}}\right)^3 \quad \text{Ecuación (3).}$$

en la que

20 r_i denota la distancia radial de la $i^{\text{ésima}}$ zona,

r_{ext} denota el radio exterior de la última zona difractiva bifocal.

Pueden emplearse también otras funciones de escalado de apodización, tales como las descritas en la solicitud de patente copendiente titulada "Lentes difractivas esféricas apodizadas", presentada el 1 de diciembre de 2004 y que tiene un número de serie 11/000770. Además, las estructuras difractivas pueden tener formas geométricas diferentes de las descritas anteriormente.

Aunque las propiedades difractivas de los patrones trifocal y bifocal se discutieron por separado anteriormente, los dos patrones generan cooperativamente los focos de cerca, intermedio y de lejos para proporcionar, respectivamente, visión de cerca, intermedia y de lejos. Como se muestra esquemáticamente en la figura 3, en cada foco, la energía óptica se distribuye según un perfil que exhibe un máximo en el punto focal y se reduce en ambos lados de ese punto. Una anchura del perfil de energía difractiva (por ejemplo, anchura completa a la mitad del máximo) asociado con cada punto focal proporciona una medición de la profundidad asociada de foco. En algunas formas de realización, la fracción de energía óptica incidente (por ejemplo, en forma de rayos incidentes sustancialmente paralelos) dirigida a cada una de las regiones focales de cerca y de lejos con relación a la dirigida a la región focal intermedia puede estar en un rango comprendido entre aproximadamente 1,4 y aproximadamente 4. A modo de ejemplo, la eficiencia difractiva asociada con cada uno de los focos de cerca y de lejos puede estar en un rango comprendido entre aproximadamente 28% y aproximadamente 38%, mientras que la eficiencia difractiva asociada con el foco intermedio está en un rango comprendido entre aproximadamente 10% a aproximadamente 28%.

Haciendo referencia de nuevo a la figura 2, en esta realización, el patrón difractivo trifocal se extiende desde el eje óptico hasta una distancia (radio) R desde ese eje, mientras que el patrón difractivo bifocal se extiende desde la distancia R hasta una distancia radial mayor R' (menor que un radio R'' de la superficie anterior). Por tanto, para tamaños de apertura pequeños (pupila), las propiedades de visión de cerca, intermedia y de lejos de la lente están determinadas principalmente por el patrón difractivo trifocal. Cuando aumenta el tamaño de apertura (pupila), las propiedades de la lente están dictadas principalmente por el patrón difractivo bifocal. En esta realización, cuando aumenta el tamaño de apertura, aumenta la fracción de energía óptica dirigida a los focos de cerca y de lejos con relación a la dirigida al foco intermedio. Además, como se hace notar anteriormente, la apodización de las alturas de escalón de las zonas difractivas bifocales da como resultado un incremento en la energía óptica dirigida al foco de lejos con relación al foco de cerca, cuando aumenta el tamaño de apertura. Generalmente, se selecciona el radio de la óptica (R'') para estar en un rango comprendido entre aproximadamente 2,5 y aproximadamente 3,5 milímetros, estando el radio del patrón trifocal (R) en un rango comprendido entre aproximadamente 1 y aproximadamente 1,5 milímetros y el del patrón bifocal (R') en un rango de aproximadamente 1,5 y aproximadamente 2 milímetros – aunque pueden emplearse también otros valores. Además, aunque sólo se representan aquí unas pocas zonas anulares para fines de claridad, el número de zonas anulares en cada uno de los patrones trifocal y bifocal puede estar generalmente en un rango comprendido entre aproximadamente 3 y aproximadamente 30 y puede basarse más en el incremento de la potencia de adición.

60 La potencia óptica asociada con el foco de lejos puede estar, por ejemplo, en un rango comprendido entre aproximadamente 6 y aproximadamente 34 dioptrías. El foco intermedio puede proporcionar una potencia de adición

en un rango comprendido entre aproximadamente 1,5 y aproximadamente 4,5 dioptrías, y el foco de cerca puede proporcionar una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 3 y aproximadamente 9 dioptrías.

5 Así, la lente IOL trifocal anterior 10 proporciona visión de lejos para ver objetos a distancias que van, por ejemplo, desde alrededor del infinito hasta aproximadamente 4 metros (m), y la visión de cerca para ver objetos a distancias menores que, por ejemplo, aproximadamente 0,4 m. Además, la IOL 10 proporciona visión intermedia para ver
10 objetos a distancias en un rango de, por ejemplo, aproximadamente 0,4 a aproximadamente 4 m (y, en algunas formas de realización, en un rango comprendido entre aproximadamente 0,4 y aproximadamente 1 m). En otras palabras, la lente oftálmica trifocal anterior proporciona ventajosamente un grado de acomodación (denominada típicamente pseudoacomodación) para tres rangos de distancia. A modo de ilustración adicional, como se muestra esquemáticamente en la figura 4A, cuando se implanta la IOL trifocal en el ojo de un paciente, la potencia combinada de la córnea del ojo y la potencia de cerca, intermedia y de lejos de la IOL permiten enfocar la luz que emana de objetos A, B y C, localizados, respectivamente, dentro de un rango de distancia de cerca, intermedia y de
15 lejos del paciente sobre la retina.

En algunas formas de realización, una lente oftálmica trifocal de la invención incluye dos patrones bifocales – que proporcionan diferentes potencias de adición – que están dispuestos en una superficie de la misma, de tal manera que proporcionen colectivamente tres regiones focales correspondientes a visión de lejos, intermedia y de cerca. A modo de ejemplo, la figura 4B ilustra esquemáticamente una pluralidad de zonas difractivas 11, formadas por dos patrones bifocales diferentes, dispuestas en una parte de una superficie anterior 13 de una lente trifocal 15 según otra realización de la invención. De manera similar a la realización previa, la superficie anterior está caracterizada por un perfil de base (no mostrado) que proporciona una potencia de foco de lejos correspondiente al 0^{ésimo} orden de difracción de cada patrón. Más específicamente, las zonas difractivas interiores 11a, 11b y 11c forman un patrón bifocal que proporciona una potencia de adición seleccionada, por ejemplo, una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 3 y aproximadamente 9 dioptrías, mientras que las zonas difractivas 11d, 11e, 11f y 11g forman otro patrón bifocal que proporciona una potencia de adición diferente, por ejemplo una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 1,5 y aproximadamente 4,5 dioptrías (se muestran las zonas de difracción sólo para fines de ilustración y no están dibujadas necesariamente a escala). Aunque en esta
20 realización el patrón bifocal interior exhibe una potencia de adición más alta que el patrón bifocal exterior, en otras formas de realización, el patrón exterior proporciona una potencia de adición mayor. Además, aunque sólo se ilustran unas pocas zonas de difracción, en muchas formas de realización, el número de zonas de difracción en cada patrón puede ir desde aproximadamente 3 a aproximadamente 30, o cualquier otro número adecuado. Las alturas de escalón en límites de zona pueden ser uniformes o no uniformes y pueden seleccionarse, por ejemplo, de una manera discutida anteriormente. La potencia de adición de cada zona puede ajustarse seleccionando las localizaciones de sus límites de zona (es decir, la distancia radial de cada zona difractiva en el patrón) de acuerdo con la siguiente relación:

$$r_i^2 = (2i + 1)\lambda f \quad \text{Ecuación (4)}$$

40 en donde

i denota el número de zona (*i*=0 denota la zona central),

45 λ denota la longitud de onda de diseño, y

f denota una potencia de adición.

En este ejemplo de realización, el patrón bifocal exterior exhibe una potencia de adición mayor que el patrón bifocal interior. Por ejemplo, los patrones bifocales exterior e interior pueden proporcionar, respectivamente, una potencia de adición de aproximadamente 4D y aproximadamente 2D correspondiente a sus órdenes de difracción +1. Sin embargo, los órdenes de difracción 0^{ésimo} de los dos patrones son sustancialmente coincidentes y dirigen la luz incidente a una región focal de lejos caracterizada por una potencia seleccionada (sobre la base de la curvatura de la superficie de la óptica y su índice de refracción) en un rango comprendido entre aproximadamente 6 y aproximadamente 34 dioptrías. Como se muestra esquemáticamente en la figura 4C, el patrón exterior proporciona un foco de lejos A2 y un foco de cerca A1 mientras que el patrón interior proporciona un foco de lejos B2 (sustancialmente coincidente con A2) y un foco de cerca B1. Por tanto, los dos patrones proporcionan colectivamente un foco de lejos, un foco intermedio y un foco de cerca, en los que el foco de cerca de los patrones interior y exterior proporciona, respectivamente, visión de cerca e intermedia.

La figura 5A y 5B representan esquemáticamente una lente oftálmica trifocal 30, por ejemplo, una IOL, de acuerdo con otra realización de la invención que incluye una óptica 32 que tiene una superficie anterior 34 y una superficie posterior 36. El perfil de referencia de la superficie anterior 34 se caracteriza por una curva de base 38 adaptada para proporcionar una potencia de foco de lejos. La superficie anterior 34 incluye además una pluralidad de zonas difractivas anulares 40, formadas por una pluralidad de estructuras difractivas microscópicas 42 que están

5 dispuestas simétricamente alrededor de un eje óptico 44 de la óptica. De manera similar a las formas de realización previas, la óptica puede formarse de un material biocompatible y la lente puede incluir además hápticas (no mostradas) que facilitan su fijación en el ojo. Además, aunque la superficie 14 y 16 en esta realización son generalmente cóncavas, en otras formas de realización, las curvaturas de superficie pueden seleccionarse para proporcionar una lente planoconvexa o planocóncava.

10 Cada zona difractiva anular está separada de una zona adyacente por un escalón (por ejemplo, un escalón 50 que separa la segunda zona de la tercera zona). Los escalones están posicionados en los límites radiales de las zonas. En esta realización, las alturas de escalón son sustancialmente uniformes aunque en otras formas de realización pueden apodizarse, por ejemplo, de una manera discutida anteriormente.

15 A diferencia de las lentes difractivas convencionales en las que las zonas difractivas tienen áreas sustancialmente uniformes, en esta realización las áreas de las zonas difractivas varían – de una manera controlada – en función de la distancia desde el eje óptico 44. Esta variación está diseñada para ampliar suficientemente perfiles de energía óptica en un foco de cerca y un foco de lejos, generados por dos órdenes de difracción de las zonas difractivas, para proporcionar una visión intermedia mientras preserva sustancialmente los focos de cerca y de lejos. Por ejemplo, haciendo referencia a la figura 5B, en esta realización, las áreas de las zonas difractivas anulares 40 aumentan progresivamente en función de la distancia creciente desde el eje óptico. Por ejemplo, la diferencia máxima entre áreas de dos zonas difractivas (por ejemplo, la diferencia en las áreas de la mayoría de zonas exterior e interior puede ser de aproximadamente 75% o más, por ejemplo, hasta aproximadamente 200%).

25 La variación de las áreas de las zonas difractivas puede implementarse seleccionando un radio al cuadrado de cada zona en función de ese número de zona, en donde las zonas están numeradas consecutivamente de forma radialmente hacia fuera desde el eje óptico, por ejemplo, de la manera descrita a continuación. A modo de ejemplo, la figura 6 proporciona gráficos que contrastan una relación (gráfico A) entre los radios al cuadrado de las zonas (r_i^2 denota el radio al cuadrado de la $i^{\text{ésima}}$ zona) y los números de zonas – empleados típicamente en lentes difractivas convencionales – con una relación diferente (gráfico B) utilizados en esta realización de una lente oftálmica trifocal de la invención. Como se hace notar en los gráficos, en la lente trifocal, los radios al cuadrado de las zonas exhiben un grado seleccionado de variación no lineal en función de los números de zona mientras que los radios al cuadrado de las zonas de la lente que tienen áreas difractivas uniformes varían linealmente en función de los respectivos números de zona. Esto modifica el patrón de interferencia de luz difractada por la lente para desviar más energía hacia una región focal intermedia.

35 Más específicamente, en la presente realización, la localización radial de un límite de zona puede determinarse de acuerdo con la siguiente relación:

$$r_i^2 = (2i + 1)\lambda f + g(i) \quad \text{Ecuación (5)}$$

40 en donde

i denota el número de zona ($i=0$ denota la zona central),

λ denota la longitud de onda de diseño,

45 f denota una longitud focal del foco de cerca, y

$g(i)$ denota una función no constante.

50 En esta realización, la función $g(i)$ se define de acuerdo con la siguiente relación:

$$g(i) = (ai^2 + bi)f,$$

en donde

55 i denota el número de zona,

a y b son dos parámetros ajustables, y

60 f denota la longitud focal del foco de cerca. A modo de ejemplo, a puede estar en un rango comprendido entre aproximadamente $0,1 \lambda$ y aproximadamente $0,3 \lambda$, y b puede estar en un rango comprendido entre aproximadamente $1,5 \lambda$ y aproximadamente $2,5 \lambda$, en donde λ denota la longitud de onda de diseño.

Como se hace notar anteriormente, la variación de las áreas de las zonas difractivas en función de la distancia desde el eje óptico da como resultado una desviación de parte de la luz difractada hacia una región focal intermedia

para proporcionar visión intermedia. Por ejemplo, una fracción de la luz difractada en un rango de aproximadamente 10% a aproximadamente 28% puede dirigirse hacia la región focal intermedia.

A modo de ejemplo, la figura 7 presenta dos gráficos (C y D) que ilustran esquemáticamente la mejora de la agudeza visual para la visión intermedia proporcionada por el ejemplo de lente oftálmica trifocal ejemplar anterior. Más específicamente, el gráfico C (líneas de trazos) muestra la distribución de la energía óptica entre un foco de cerca y un foco de lejos de una lente difractiva convencional en la que las zonas difractivas anulares tienen áreas iguales. Por el contrario, el gráfico D muestra esquemáticamente la distribución de energía óptica en una lente oftálmica según una realización de la invención en la que al menos dos o más de las zonas difractivas tienen áreas desiguales. Una comparación del gráfico D con el gráfico C muestra que una realización de una lente oftálmica de la invención que tiene zonas difractivas con áreas desiguales proporciona una mejora considerable de la agudeza visual para visión intermedia, mientras preserva sustancialmente las prestaciones visuales en visión de cerca y de lejos. A modo de ejemplo, en muchas formas de realización, la eficiencia difractiva en cada uno de los focos de cerca y de lejos puede estar en un rango comprendido entre aproximadamente 28% y aproximadamente 38%, estando la eficiencia difractiva en el foco intermedio en un rango comprendido entre aproximadamente 10% y aproximadamente 28%.

De manera similar a la realización previa, la potencia óptica asociada con el foco de lejos puede estar, por ejemplo, en un rango comprendido entre aproximadamente 6 y aproximadamente 34 dioptrías, proporcionando el foco de cerca una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 3 y aproximadamente 9 dioptrías. Además, el foco intermedio puede proporcionar, por ejemplo, una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 1,5 y aproximadamente 4,5 dioptrías con relación al foco de lejos.

La funcionalidad de las lentes trifocales anteriores puede comprenderse quizá mejor considerando el diagrama mostrado en la figura 8, que representa el retardo de fase óptica (OPD) asociado con tres órdenes de difracción (es decir, +1, 0 y -1) de una lente difractiva multifocal a través de dos zonas difractivas, en función del cuadrado de la distancia radial desde el eje óptico. Los retardos de fase asociados con el +1 y el -1 varían de manera sustancialmente lineal – mientras que el asociado con el 0^{ésimo} orden permanece sustancialmente constante – cuando el cuadrado de la distancia radial cambia de cero a un valor correspondiente al límite de la primera zona difractiva con la segunda (designada aquí por ZB12). En el límite de zona, la fase óptica asociada con cada orden exhibe una discontinuidad. Aunque no se muestra, ocurre una discontinuidad de fase similar en el límite de la segunda zona con la tercera (designada en ZB23), etc. Si los límites de zona se colocan en posiciones radiales cuadradas correspondientes al cambio de fase óptica π a través de cada zona difractiva, la energía óptica difractada en el 0^{ésimo} orden desaparece sustancialmente. En otras palabras, la lente proporciona efectivamente sólo dos órdenes de difracción (foco de cerca y de lejos). Sin embargo, en muchas formas de realización de la invención, las localizaciones radiales cuadradas de uno o más límites de zona difractiva se seleccionan de tal manera que el cambio de fase óptica a través de una zona difractiva es menor que π (por ejemplo, es $\pi/4$). Esto lleva al desvío de parte de la energía óptica difractada en el 0^{ésimo} orden, proporcionando así visión intermedia.

En algunas formas de realización, la visión a distancia proporcionada por la lente oftálmica trifocal se mejora por corrección de aberración para aperturas grandes (por ejemplo, tamaños de apertura mayores que aproximadamente 3 mm de diámetro, aunque en algunas formas de realización la corrección de aberración puede utilizarse también para tamaños de apertura menores). Tal corrección de aberración puede contraequilibrar, por ejemplo, luz desenfocada, si la hubiera, que puede aparecer en el foco de lejos como resultado de un incremento de luz en la región focal intermedia. Por ejemplo, el perfil de base (curva) de la superficie anterior puede seleccionarse por tener algún grado de asfericidad a fin de reducir efectos de aberración esférica, que pueden ser particularmente pronunciados para aperturas grandes. Algún ejemplo de tales perfiles asféricos adecuados para uso en la práctica de la invención se describe en la solicitud de patente de Estados Unidos copendiente antes mencionada titulada "Lentes difractivas asféricas apodizadas".

A modo de ejemplo, el perfil asférico de la superficie anterior en función de la distancia radial (R) desde el eje óptico de la lente puede caracterizarse por la siguiente relación;

$$z = \frac{cR^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + cc)c^2 R^2}} + adR^4 + aeR^6 + \text{términos de orden mayor,}$$

en la que,

z denota una combadura de la superficie paralela a un eje (z), por ejemplo el eje óptico, perpendicular a la superficie,

c denota una curvatura en el vértice de la superficie,

cc denota un coeficiente cónico,

R denota una posición radial de la superficie,

5

ad denota un coeficiente de deformación de cuarto orden, y

ae denota un coeficiente de deformación de sexto orden.

10

Los expertos ordinarios en la materia apreciarán que pueden realizarse diversas modificaciones a las formas de realización anteriores sin apartarse del alcance de la invención definido por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Lente oftálmica multifocal (10, 15), que comprende una óptica (12, 32) que tiene una superficie (13, 14, 16, 34, 36) que comprende al menos dos patrones difractivos diferentes (11, 26, 42) adaptados y dispuestos uno con relación a otro para proporcionar colectivamente visión de cerca, intermedia y de lejos, comprendiendo los dos patrones difractivos diferentes un primer conjunto de escalones difractivos anulares que es bifocal o trifocal con focos correspondientes a los órdenes difractivos -1, 0 o +1 para una longitud de onda de luz seleccionada en el espectro visible en uso oftálmico y un segundo conjunto de escalones difractivos anulares que es bifocal o trifocal con focos correspondientes a los órdenes difractivos -1, 0 o +1 para la longitud de onda de luz seleccionada en el espectro visible en uso oftálmico,
- caracterizada porque los dos conjuntos diferentes de escalones difractivos no se solapan en la dirección radial, los dos patrones difractivos diferentes son concéntricos y los dos patrones difractivos diferentes tienen diferentes focos incluyendo colectivamente un foco de cerca, de lejos e intermedio.
2. Lente oftálmica multifocal según la reivindicación 1, en la que uno de dichos patrones difractivos comprende un patrón trifocal (26a-c), y el otro patrón difractivo comprende un patrón bifocal (26d-i).
3. Lente oftálmica multifocal según la reivindicación 2, en la que dicho patrón bifocal (26d-i) muestra alturas de escalón apodizadas.
4. Lente oftálmica multifocal según la reivindicación 2, en la que dicho patrón trifocal (26a-c) está dispuesto más cerca de un eje óptico (18) de dicha óptica (12) que dicho patrón bifocal (26d-i).
5. Lente oftálmica multifocal según la reivindicación 1, en la que dichos patrones difractivos comprenden dos patrones bifocales (11 a-c; 11 d-g) que tienen diferentes potencias de adición.
6. Lente oftálmica multifocal según la reivindicación 2, en la que dicho patrón bifocal (26d-i) está adaptado para proporcionar visión de cerca y de lejos y dicho patrón trifocal (26a-c) está adaptado para proporcionar visión de cerca, de lejos e intermedia.
7. Lente multifocal según la reivindicación 6, en la que dicha superficie está caracterizada porque presenta una curva de referencia de base (22) adaptada para proporcionar un foco refractivo correspondiente a dicha visión de lejos.
8. Lente multifocal según la reivindicación 6, en la que dichos patrones difractivos están dispuestos dentro de una parte de dicha superficie rodeada por una parte periférica (28) de dicha superficie que está sustancialmente desprovista de estructuras difractivas.
9. Lente multifocal según la reivindicación 8, en la que cada uno de dichos patrones difractivos comprende una o más estructuras difractivas anulares simétricamente dispuestas alrededor de un eje óptico (18) de dicha óptica.
10. Lente multifocal según la reivindicación 9, en la que dichas estructuras difractivas anulares que constituyen dicho patrón difractivo trifocal (26a-c) están dispuestas más cerca de dicho eje óptico (18) que dichas estructuras difractivas anulares que constituyen dicho patrón difractivo bifocal (26d-i).
11. Lente multifocal según la reivindicación 10, en la que dichas zonas difractivas anulares que constituyen dicho patrón difractivo trifocal (26a-c) se extienden desde dicho eje óptico hasta un radio correspondiente a un tamaño de apertura en un rango comprendido entre aproximadamente 1 mm y aproximadamente 1,5 mm.
12. Lente multifocal según la reivindicación 11, en la que dicho patrón difractivo bifocal (26d-i) rodea anularmente dicho patrón difractivo trifocal (26a-c).
13. Lente multifocal según la reivindicación 12, en la que dichas estructuras difractivas anulares bifocales (26d-i) presentan una altura de escalón decreciente (50) en sus límites en función de la distancia creciente desde el eje óptico.
14. Lente multifocal según la reivindicación 13, en la que dicha altura de escalón decreciente (50) está caracterizada porque presenta una función de apodización seleccionada.
15. Lente multifocal según la reivindicación 14, en la que dicha función de apodización se define de acuerdo con la siguiente relación:

$$f_{\text{apodizar}} = 1 - \left(\frac{r_i}{r_{\text{ext}}} \right)^3,$$

en la que r_i denota la distancia radial de la $i^{\text{ésima}}$ zona,

r_{ext} denota el radio exterior de la última zona difractiva bifocal (26i).

- 5 16. Lente multifocal según la reivindicación 6, en la que dicho patrón difractivo trifocal (26a-c) comprende uno o más escalones sustancialmente en forma cuadrada y dicho patrón difractivo bifocal (26d-i) comprende uno o más escalones sustancialmente en forma de dientes de sierra.
- 10 17. Lente multifocal según la reivindicación 6, en la que dicho patrón difractivo trifocal (26a-c) proporciona un foco de cerca, un foco de lejos y un foco intermedio, siendo sustancialmente coincidentes dichos focos de cerca y de lejos trifocales, respectivamente, con un foco de cerca y un foco de lejos de dicho patrón bifocal (26d-i).
- 15 18. Lente multifocal según la reivindicación 17, en la que dichos focos de cerca, intermedio y de lejos corresponden sustancialmente, de manera respectiva, a dicha visión de cerca, intermedia y de lejos.
- 20 19. Lente oftálmica multifocal según la reivindicación 1, que comprende una lente oftálmica trifocal (30) que comprende una óptica (32) que tiene al menos una superficie (34, 36) caracterizada porque presenta una curva de base (38), y al menos dos patrones difractivos anulares (42) dispuestos en dicha óptica, proporcionando uno de dichos patrones principalmente tres focos y proporcionando el otro principalmente dos focos, de tal manera que una combinación de distribución de energía asociada a los focos de un patrón con la del otro patrón da como resultado la provisión de visión de cerca, intermedia y de lejos.
- 25 20. Lente trifocal según la reivindicación 19, en la que dicha curva de base (38) proporciona una potencia refractiva correspondiente a dicha visión de lejos.
- 30 21. Lente trifocal según la reivindicación 19, en la que dichos patrones difractivos (42) están rodeados por una parte periférica de dicha óptica que está desprovista de estructuras difractivas.
- 35 22. Lente trifocal según la reivindicación 21, en la que dicho patrón difractivo (42) que proporciona tres focos está dispuesto más cerca de un eje óptico (44) de dicha óptica que dicho patrón difractivo que proporciona dos focos.
- 40 23. Lente trifocal según la reivindicación 21, en la que dicho patrón difractivo (42) que proporciona tres focos comprende una pluralidad de zonas difractivas anulares que se extienden desde un eje óptico (44) de dicha óptica hasta una primera distancia desde ese eje.
- 45 24. Lente trifocal según la reivindicación 23, en la que dicho patrón difractivo que proporciona dos focos comprende una pluralidad de zonas difractivas anulares que se extienden desde dicha primera distancia hasta una segunda distancia menor que un radio de dicha óptica.
- 50 25. Lente trifocal según la reivindicación 19, en la que dicha curva de base (38) es esférica para reducir una aberración esférica.
- 55 26. Lente oftálmica multifocal (15) según la reivindicación 1, en la que los dos patrones difractivos diferentes comprenden dos patrones bifocales independientes (11a-c; 11d-g), presentando dichos patrones diferentes potencias de adición para proporcionar cooperativamente visión de cerca, intermedia y de lejos.
27. Lente multifocal según la reivindicación 26, en la que uno de dichos patrones (11a-c) proporciona una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 3 y aproximadamente 9 dioptrías y el otro patrón (11 d-g) proporciona una potencia de adición en un rango comprendido entre aproximadamente 1,5 y aproximadamente 4,5 dioptrías.
28. Lente multifocal según la reivindicación 26, en la que uno de dichos patrones (11a-c) está dispuesto más cerca de un eje óptico de dicha óptica que el otro patrón (11 d-g).
29. Lente multifocal según la reivindicación 28, en la que cada uno de dichos patrones comprende una pluralidad de zonas de difracción concéntricas (11) dispuestas alrededor de dicho eje óptico.

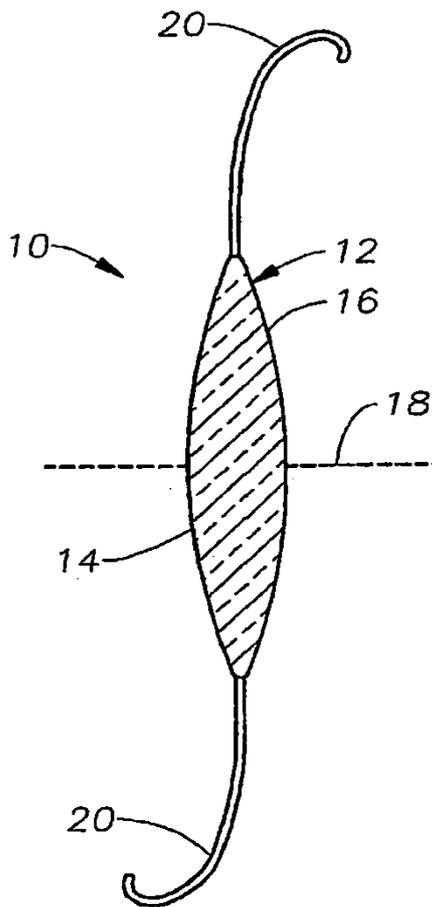


Fig. 1A

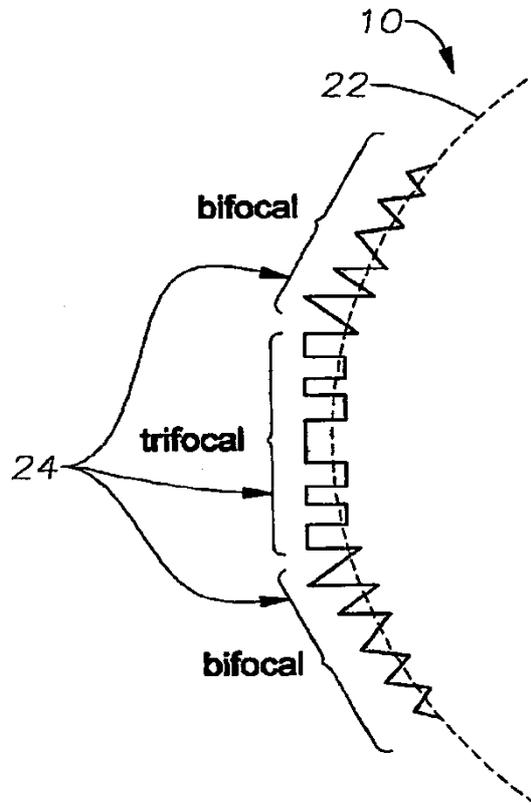


Fig. 1B

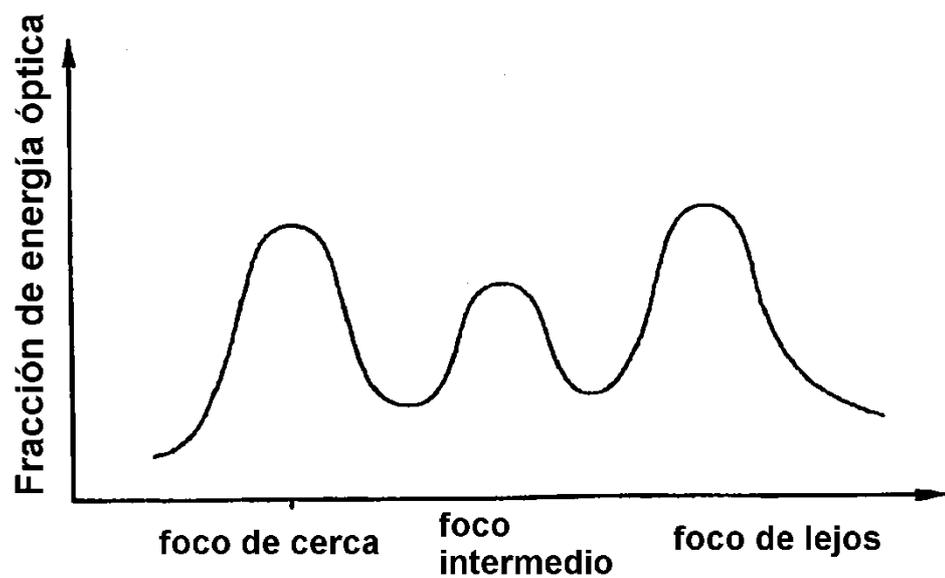
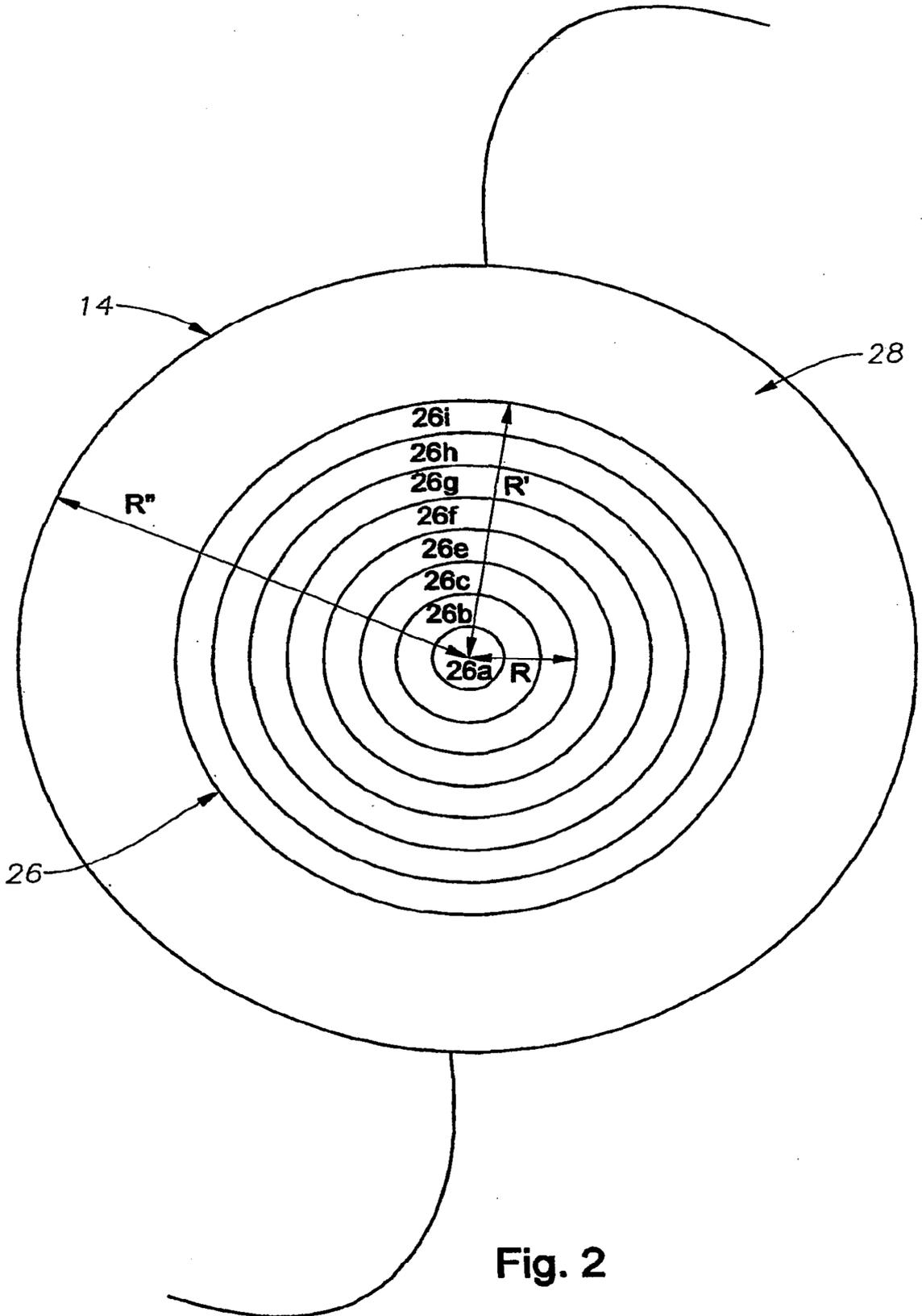


Fig. 3



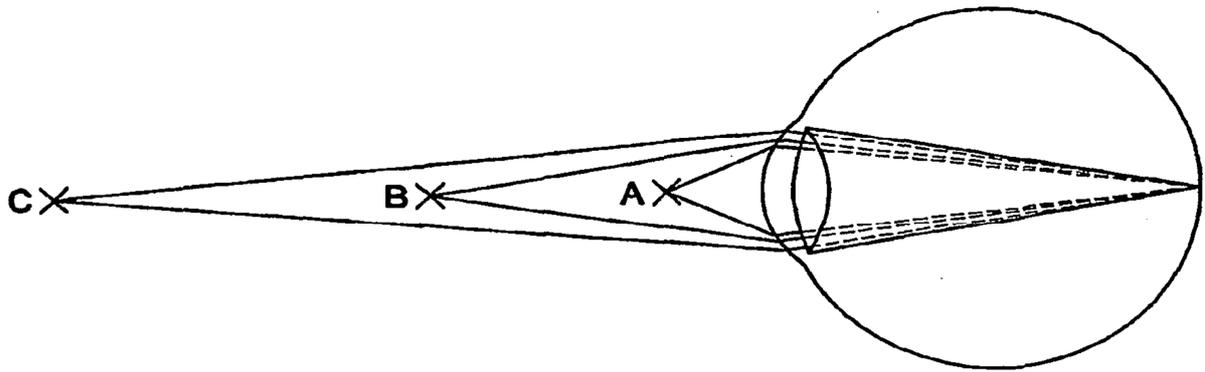


Fig. 4A

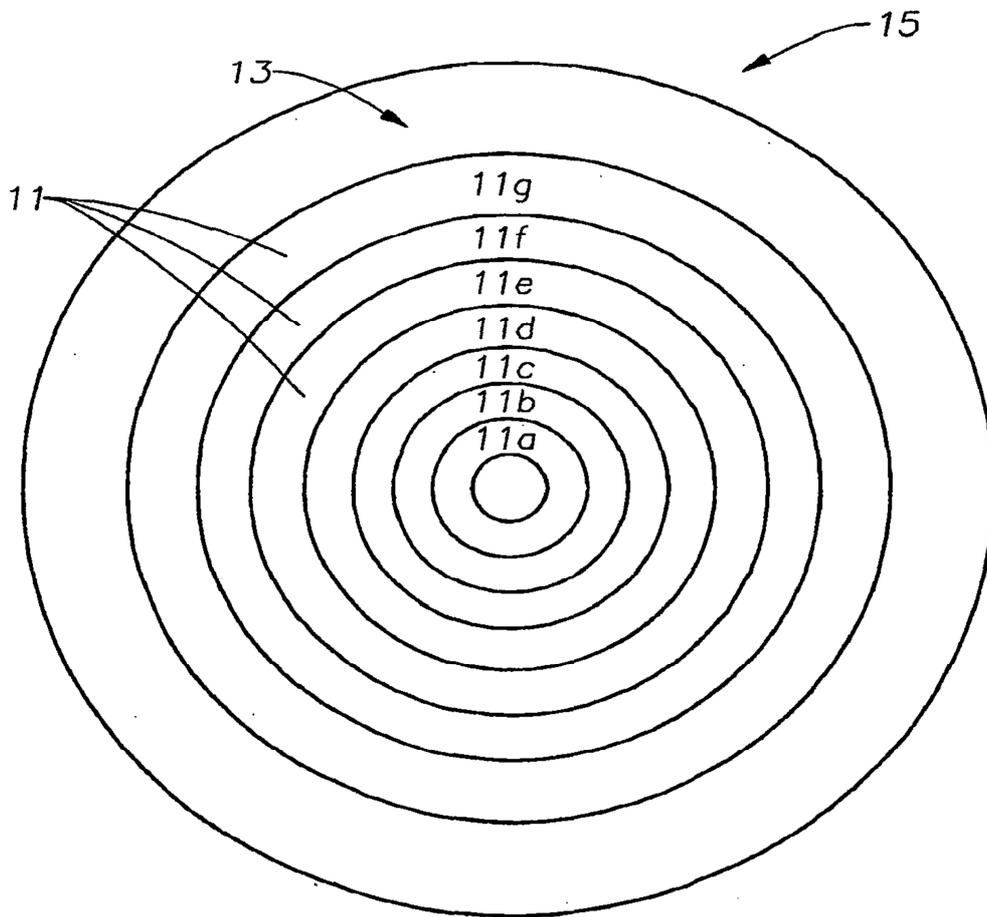
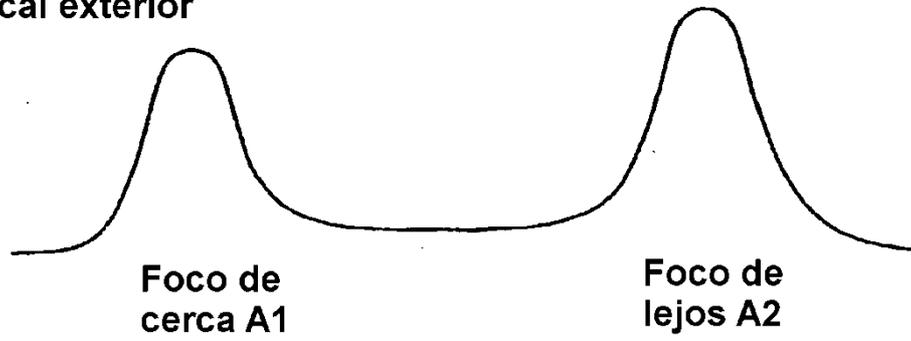
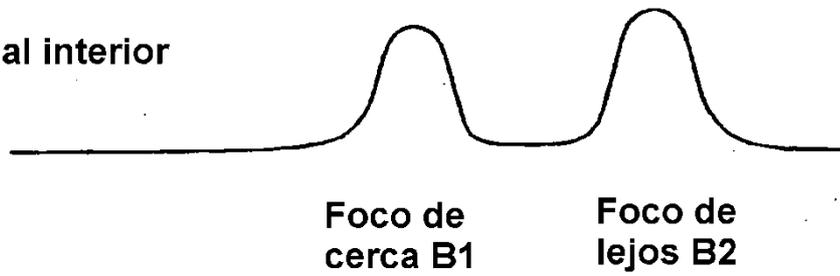


Fig. 4B

Patrón bifocal exterior



Patrón bifocal interior



Patrones combinados

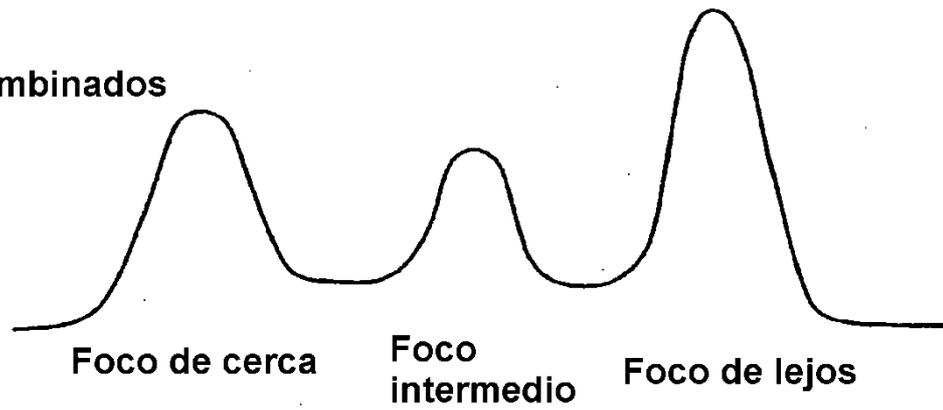


Fig. 4C

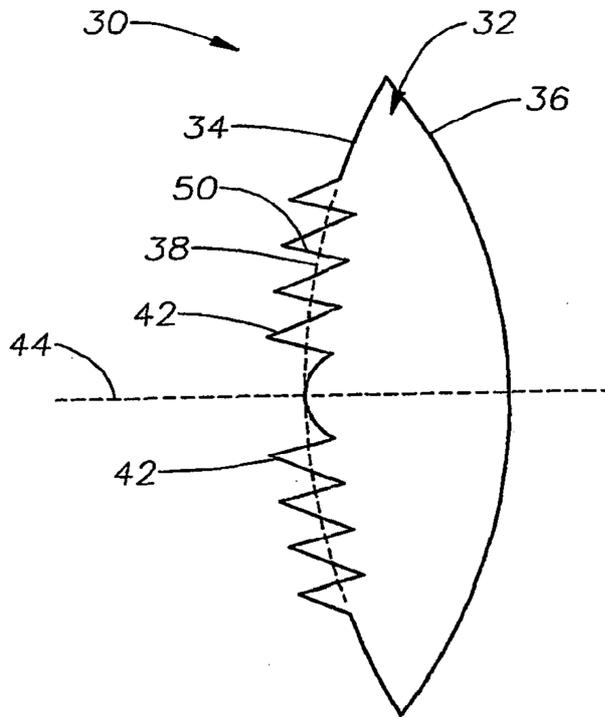


Fig. 5A

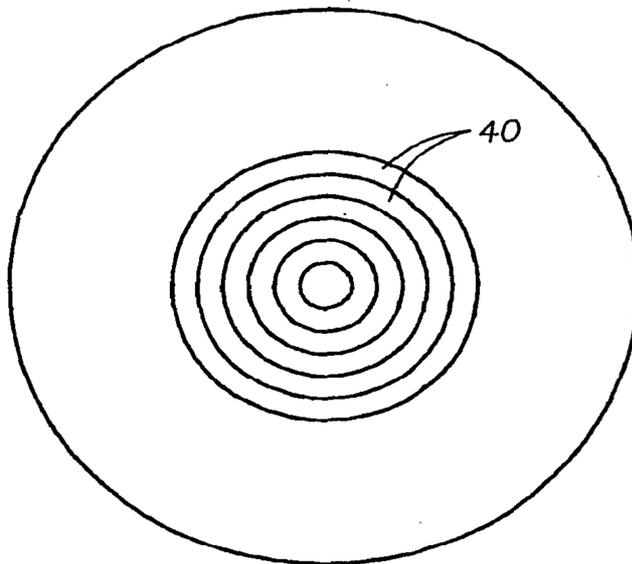
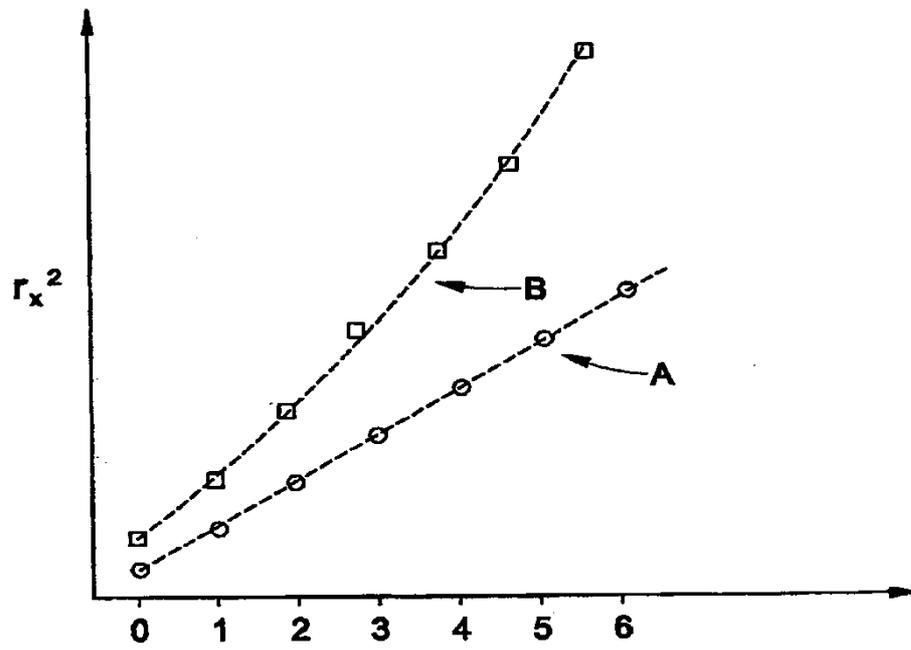


Fig. 5B



Número de anillos difractivos

Fig. 6

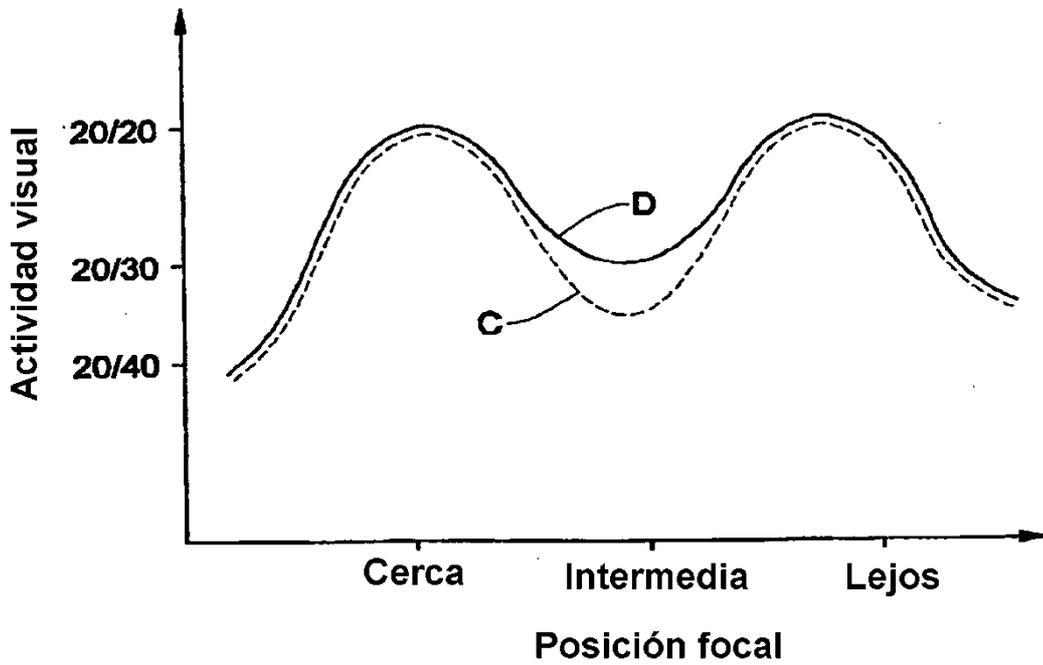


Fig. 7

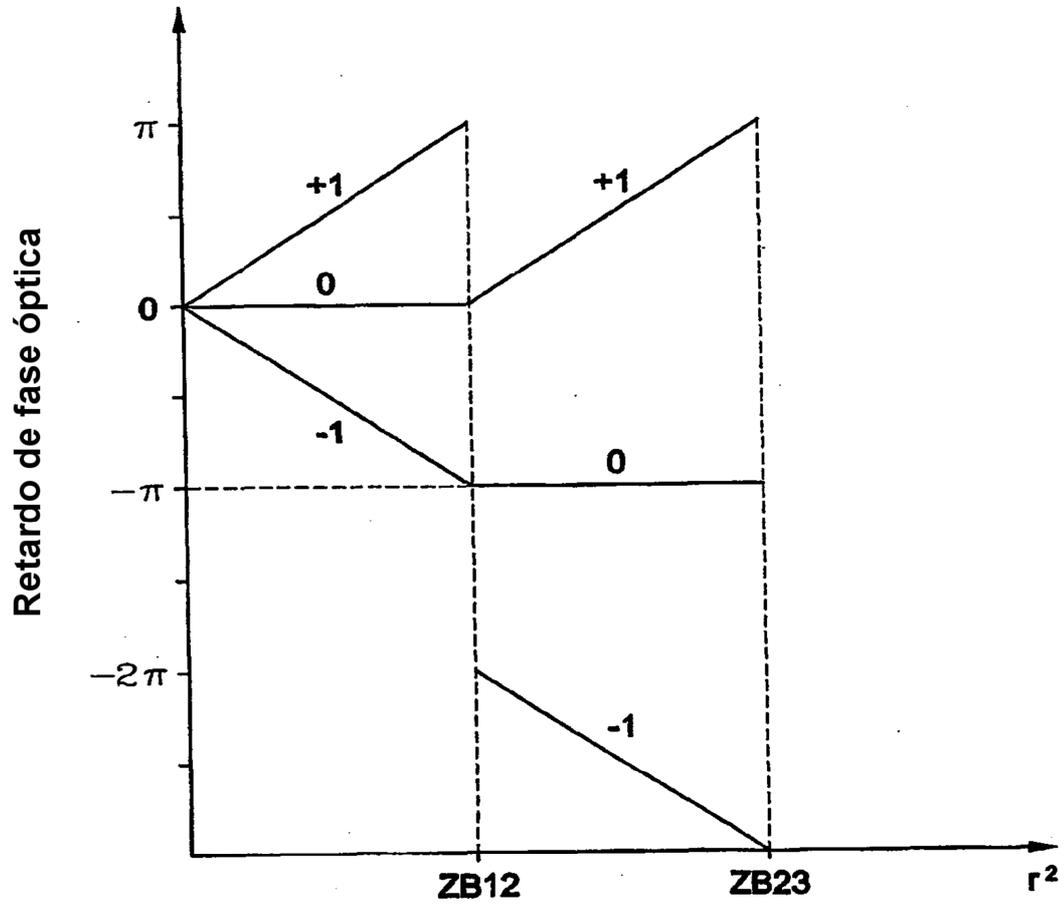


Fig. 8