(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 545 305**

(51) Int. CI.:

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 07763097 (8)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.07.2015 EP 1982229**

(54) Título: **IOL pseudoacomodativas que presentan zonas de difracción con áreas variables**

(30) Prioridad:

09.02.2006 US 350497

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
09.09.2015

(73) Titular/es:

ALCON RESEARCH, LTD. (100.0%)
6201 South Freeway
Fort Worth TX 76134, US

(72) Inventor/es:

HONG, XIN;
VANNOY, STEPHEN J. y
ZHANG, XIAOXIAO

(74) Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

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 pseudoacomodativas que presentan zonas de difracción con áreas variables.

Antecedentes

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

Están disponibles una pluralidad de lentes oftálmicas para corregir trastornos visuales, tales como cataratas, miopía, hipermetropía o astigmatismo. Por ejemplo, una lente intraocular (IOL) puede implantarse en el ojo de un paciente durante cirugía de cataratas para compensar la pérdida de potencia óptica de la lente natural retirada. Aunque proporcionan la potencia óptica necesaria, las IOL no proporcionan la acomodación (es decir, la capacidad para enfocar un objeto a distancias variables) que puede conseguirse mediante una lente natural. Sin embargo, se conoce que las IOL multifocales pueden proporcionar un determinado grado de acomodación (también conocido como pseudoacomodación). Por ejemplo, están disponibles IOL de difracción bifocales que pueden proporcionar un foco cercano y uno lejano.

También se conocen lentes oftálmicas trifocales para proporcionar un foco cercano y uno lejano, así como un foco intermedio. Tales lentes trifocales convencionales, sin embargo, presentan varias limitaciones. Por ejemplo, proporcionan una visión intermedia a expensas de una degradación de la visión de lejos y/o de cerca.

Por consiguiente, existe la necesidad de lentes oftálmicas multifocales, y particularmente, lentes oftálmicas trifocales mejoradas. También existe la necesidad de lentes multifocales de este tipo en forma de lentes intraoculares (IOL) que puedan implantarse en los ojos de los pacientes, por ejemplo, para sustituir la lente natural.

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

Sumario

La presente invención se refiere en general a lentes oftálmicas de difracción, tales como lentes intraoculares trifocales (IOL), que proporcionan visión de cerca y de lejos, así como visión intermedia según las reivindicaciones más abajo. Las lentes oftálmicas de la invención utilizan estructuras de difracción para dirigir la luz incidente hacia tres regiones focales correspondientes a visión de cerca, intermedia y de lejos. Por ejemplo, las lentes oftálmicas incluyen una pluralidad de zonas de difracción con áreas variables para provocar la expansión de los perfiles de energía óptica en un foco cercano y uno lejano generada por esas zonas, creando así un foco intermedio. En algunos casos, una diferencia máxima entre las áreas de las zonas de difracción puede estar, por ejemplo, en un intervalo de aproximadamente el 75% a aproximadamente el 200%.

En un aspecto de la invención, se da a conocer una lente oftálmica trifocal que incluye una óptica que presenta al menos una superficie óptica, y una pluralidad de zonas de difracción que están dispuestas en una parte de esa superficie alrededor de un eje óptico de la óptica. Al menos dos de esas zonas de difracción presentan unas áreas diferentes para provocar la expansión de perfiles de energía óptica en un foco cercano y uno lejano de las zonas de difracción para generar un foco intermedio. A modo de ejemplo, las zonas de difracción pueden dirigir al menos aproximadamente el 25% de la energía de luz incidente, o preferentemente al menos aproximadamente el 28% de la energía de luz incidente, hacia cada uno de los focos cercano y lejano, mientras dirige al menos aproximadamente el 10% de la energía de luz incidente al foco intermedio. La superficie óptica también puede incluir un perfil de referencia caracterizado por una curva de base para generar una potencia de refracción correspondiente al foco lejano. El término “zona de difracción”, tal como se utiliza en la presente memoria, se refiere a un área de la superficie que contiene una o más estructuras de difracción que se repiten, o bien de manera idéntica o según una apodización seleccionada, para generar un patrón de difracción dispuesto sobre esa superficie.

En un aspecto relacionado, las zonas de difracción muestran áreas que aumentan en función del aumento de la distancia con respecto al eje óptico. Por ejemplo, las zonas de difracción pueden estar formadas como zonas anulares, donde un cuadrado del radio de una zona está definido por la siguiente relación:

$$r_i^2 = (2i + 1)\lambda f + g(i),$$

donde *i* indica un número de zona, r_i^2 indica un radio al cuadrado de esa zona, y *f* indica una potencia añadida del foco cercano con respecto al foco lejano, λ indica una longitud de onda de diseño, y *g(i)* indica una función no constante de *i.*

A modo de ejemplo, la función *g(i)* puede definirse de la siguiente manera:

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

donde *i* indica el número de zona,

a y *b* son dos parámetros ajustables, y

f indica la longitud focal del foco cercano. A modo de ejemplo, *a* puede estar en un intervalo de aproximadamente 0,1 λ a aproximadamente 0,3 λ, y *b* puede estar en un intervalo de aproximadamente 1,5 λ a aproximadamente 2,5 λ, donde λ indica la longitud de onda de diseño.

En otro aspecto, la invención proporciona una lente oftálmica trifocal que comprende una óptica que presenta una superficie caracterizada por una curva de referencia de base, y una pluralidad de estructuras de difracción anulares superpuestas a una parte de esa curva de base alrededor de un eje óptico de la óptica. Las estructuras de difracción muestran anchuras variables para proporcionar en conjunto visión de cerca, intermedia y de lejos.

En un aspecto relacionado, las estructuras de difracción muestran anchuras crecientes en función de la distancia creciente con respecto al eje óptico. A modo de ejemplo, las anchuras de las estructuras de difracción pueden aumentar radialmente hacia fuera con respecto al eje óptico de una manera lineal o no lineal. A modo de ejemplo, en algunas formas de realización, las anchuras aumentan de manera lineal de modo que una diferencia de porcentaje máxima en las anchuras de las estructuras oscila entre aproximadamente el 75% y aproximadamente el 200%.

En otro aspecto, se da a conocer una lente oftálmica multifocal que incluye una óptica que presenta al menos una superficie óptica, y al menos dos zonas de difracción dispuestas en esa superficie. Una de las zonas de difracción presenta un área mayor que un área de la otra zona en un factor en un intervalo de aproximadamente el 75% a aproximadamente el 200% de modo que las zonas proporcionan en conjunto visión de cerca, intermedia y de lejos.

Puede obtenerse una mejor comprensión de la invención haciendo referencia a la siguiente descripción detallada junto con los dibujos asociados, que se describen brevemente a continuación.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1A es una vista en sección transversal esquemática de una lente oftálmica trifocal según una forma de 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 de difracción superpuestas a un perfil de base,

la figura 2 es una vista frontal de la lente de difracción de las figuras anteriores que ilustra una pluralidad de zonas anulares formadas por las estructuras de difracción,

la figura 3 muestra una distribución a modo de ejemplo de potencia óptica en las regiones focales cercana, intermedia y lejana de una lente oftálmica trifocal según una forma de realización de la invención,

la figura 4A ilustra esquemáticamente el enfoque de luz que sale de un objeto cercano, uno intermedio y uno lejano sobre la retina de un ojo en el que se implanta una lente IOL trifocal según una forma de realización de la invención,

la figura 4B es una vista frontal esquemática de una lente oftálmica trifocal según otra forma de realización de la invención que presenta patrones de difracción bifocal internos y externos con diferentes potencias añadidas seleccionadas de modo que los patrones proporcionan en conjunto visión de cerca, intermedia y de lejos,

la figura 4C ilustra esquemáticamente perfiles de energía óptica en focos cercano y lejano de patrones bifocales individuales, de la lente mostrada en la figura 4B, así como los perfiles de energía en focos cercano, intermedio y lejano proporcionados en conjunto por los patrones combinados,

la figura 5A es una vista en sección transversal esquemática de una lente oftálmica trifocal según otra forma de realización de la invención que presenta zonas de difracción con áreas diferentes,

la figura 5B es una vista frontal de la lente oftálmica de la figura 5A,

la figura 6 presenta dos gráficos esquemáticos que comparan las relaciones entre los radios al cuadrado de las zonas de difracción de dos lentes de difracción, mostrando en una de ellas las zonas de difracción áreas uniformes y mostrando en la otra áreas no uniformes,

la figura 7 presenta dos gráficos esquemáticos que ilustran la mejora de la agudeza visual para visión intermedia proporcionada por una lente oftálmica trifocal según una forma de realización de la invención,

la figura 8 ilustra esquemáticamente el retardo de fase óptica (OPD) asociado con tres órdenes de difracción de una lente oftálmica de difracción multifocal a través de dos órdenes de difracción en función de la distancia radial al cuadrado con respecto al eje óptico de la lente.

Descripción detallada

La presente invención se refiere 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 un rendimiento visual mejorado para la visión intermedia en relación al obtenido normalmente mediante las lentes trifocales convencionales mientras se mantiene, y en muchos casos se supera, el rendimiento visual de cerca y de lejos de tales lentes convencionales. En formas de realización comentadas más abajo, se describen diversos aspectos de las lentes trifocales de la invención en relación con lentes intraoculares. Sin embargo, se entenderá que los principios de la invención pueden aplicarse de manera similar a la fabricación de otras lentes oftálmicas, tales como lentes de contacto.

Con referencia a las figuras 1A y 1B, una lente oftálmica trifocal 10 según una forma de realización de la invención incluye una óptica 12 que presenta una superficie óptica anterior 14 y una superficie óptica posterior 16. En esta forma de realización, las superficies ópticas anterior y posterior están dispuestas de manera simétrica alrededor de un eje óptico 18 de la lente, aunque también pueden emplearse superficies asimétricas. La lente 10 a modo de ejemplo también incluye una háptica o elementos de fijación 20 que se extienden radialmente para su colocación en el ojo de un paciente. La óptica 12 puede estar formada por cualquier material biocompatible adecuado. Algunos ejemplos de tales materiales incluyen, sin limitación, compuestos acrílicos blandos, silicona, hidrogel u otros materiales poliméricos biocompatibles que presentan un índice de refracción necesario para una aplicación particular de la lente. Los elementos de fijación 20 también pueden estar formados por materiales poliméricos adecuados, tales como poli(metacrilato de metilo), polipropileno y similares. Aunque las superficies 14 y 16 están ilustradas siendo generalmente convexas, cualquier superficie puede presentar una forma generalmente cóncava. Alternativamente, las superficies 14 y 16 pueden seleccionarse para proporcionar una lente de plano convexo o de plano cóncavo. El término “lente intraocular” y su abreviatura “IOL” se utilizan en la presente memoria de manera intercambiable para describir lentes que se implantan en el interior de un ojo para o bien sustituir la lente natural del ojo o bien, de otro modo, aumentar la visión independientemente de si se retira o no la lente natural.

La superficie anterior 14 está caracterizada por una curva de base 22 (ilustrada por líneas discontinuas) que proporciona una potencia de refracción seleccionada y a la que se superponen una pluralidad de estructuras de difracción 24. Como se muestra esquemáticamente en la figura 2, las estructuras de difracción 24 pueden caracterizarse como que forman una pluralidad de zonas de difracción anulares concéntricas 26 que difractan la luz incidente a una pluralidad de órdenes de difracción, de una manera comentada más abajo en más detalle. Las zonas de difracción 26 están confinadas dentro de una parte de la superficie que está rodeada por una parte 28 periférica que carece de estructuras de difracción. Dicho de otro modo, las zonas de difracción están truncadas de modo que la parte periférica de la superficie anterior proporciona una potencia meramente de refracción dictada por la curva de base. En esta forma de realización, las zonas de difracción se caracterizan por dos patrones de difracción, uno de los cuales se denomina en la presente memoria patrón trifocal y el otro, patrón bifocal. Más específicamente, las zonas anulares 26a, 26b, y 26c, que forman el patrón de difracción trifocal, dirigen en conjunto la luz incidente principalmente a tres órdenes de difracción (en la presente memoria denominados órdenes de difracción “+1”, “0” y “-1”). La luz dirigida al orden de difracción +1 converge para formar un foco cercano mientras que los haces de luz dirigidos a órdenes de difracción 0 y -1 convergen para formar, respectivamente, un foco intermedio y uno lejano (a distancia). Se apreciará que las zonas de difracción que forman el patrón trifocal difractan también luz a órdenes superiores. Sin embargo, el patrón trifocal difracta un gran porcentaje de la luz incidente, por ejemplo, aproximadamente el 60% o más, a los tres órdenes anteriores.

En esta forma de realización a modo de ejemplo, las zonas de difracción anulares 26d, 26e, 26f, 26g, 26h y 26i forman el patrón de difracción bifocal, que difracta la luz incidente principalmente a dos órdenes de difracción (por ejemplo, los órdenes “0” y “+1”). La luz difractada al orden 0-ésimo del patrón bifocal converge a un foco que es sustancialmente coincidente con el foco a distancia anterior generado por la convergencia de la luz difractada al orden -1 del patrón trifocal. Además, la luz difractada al orden de difracción +1 del patrón bifocal converge a un foco que es sustancialmente coincidente con el foco cercano anterior generado por la convergencia de la luz difractada al orden de difracción +1 del patrón trifocal. De manera similar al patrón trifocal, el patrón bifocal también difracta la luz a órdenes superiores. Sin embargo, difracta la mayor parte de la energía óptica incidente, por ejemplo, aproximadamente el 60% o más, a los órdenes 0 y -1 anteriores.

Además, el foco de refracción proporcionado por la curva de base de la superficie anterior corresponde sustancialmente al foco lejano generado por los patrones de difracción. Es decir, la potencia de refracción de la lente contribuye al rendimiento de la lente para la visión de lejos.

Como se muestra esquemáticamente en la figura 1B, en esta forma de realización a modo de ejemplo, las zonas de difracción trifocales están formadas por estructuras (escalones) de difracción sustancialmente rectangulares, que

están separadas entre sí en sus límites de zona por una altura de escalón sustancialmente uniforme. A modo de ejemplo, la altura de escalón a una longitud de onda de diseño puede definirse según la siguiente relación:

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

en la que

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

a indica 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 indica 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 presenta 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 también pueden utilizarse otras alturas de escalón.

Por el contrario, las zonas de difracción bifocales en esta forma de realización a modo de ejemplo están formadas por una pluralidad de estructuras de difracción en forma de diente de sierra, que están separadas entre sí en sus límites de zona respectivos por alturas de escalón no uniformes. Más específicamente, las alturas de escalón en los límites de zona del patrón bifocal disminuyen progresivamente a medida que aumentan sus distancias con respecto al eje óptico. Dicho de otro modo, las alturas de escalón en los límites de las estructuras de difracción bifocales se "apodizan" para modificar la fracción de energía óptica difractada a los focos cercano y lejano en función del tamaño de apertura (por ejemplo, a medida que aumenta el tamaño de apertura, se difracta más de la energía de luz al foco lejano). A modo de ejemplo, la altura de escalón en cada límite de zona del patrón de difracción bifocal puede definirse según la siguiente relación:

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

en la que

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

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

n_2 indica el índice de refracción de la óptica,

n_1 indica el índice de refracción de un medio en el que está colocada la lente, y

$f_{\text{apodización}}$ representa una función de ajuste a escala cuyo valor disminuye en función de un aumento de la distancia radial con respecto a la intersección del eje óptico con la superficie anterior de la lente. A modo de ejemplo, la función de ajuste a escala $f_{\text{apodización}}$ puede definirse mediante la siguiente relación:

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

en la que

r_i indica la distancia radial de la zona i-ésima,

r_{ext} indica el radio externo de la última zona de difracción bifocal.

También pueden emplearse otras funciones de ajuste a escala de apodización tales como las dadas a conocer en la solicitud de patente en tramitación junto con la presente, titulada “Apodized Aspheric Diffractive Lens”, presentada el 1 de diciembre de 2004 y que presenta el número de serie 11/000770. Además, las estructuras de difracción pueden presentar formas geométricas diferentes de las descritas anteriormente.

Aunque las propiedades de difracción de los patrones trifocal y bifocal se comentaron por separado anteriormente, los dos patrones generan en conjunto los focos cercano, intermedio y lejano 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 muestra un máximo en el punto focal y disminuye en ambos lados de ese punto. Una anchura del perfil de energía de difracción (por ejemplo, anchura completa a la mitad del máximo) asociada con cada punto focal proporciona una medida de la profundidad asociada del foco. En algunas formas de realización, la fracción de energía óptica incidente (por ejemplo, en forma de rayos incidentes sustancialmente paralelos) dirigida hacia cada una de las regiones focales cercana y lejana en relación a la dirigida a la región focal intermedia puede estar en un intervalo de aproximadamente 1,4 a aproximadamente 4. A modo de ejemplo, la eficiencia de difracción asociada con cada uno de los focos cercano y lejano puede estar en un intervalo de aproximadamente el 28% a aproximadamente el 38%, mientras que la eficiencia de difracción asociada con el foco intermedio se encuentra en un intervalo de aproximadamente el 10% a aproximadamente el 28%.

Con referencia de nuevo a la figura 2, en esta forma de realización, el patrón de difracción trifocal se extiende desde el eje óptico a una distancia (radio) R con respecto al eje, mientras que el patrón de difracción bifocal se extiende desde la distancia R a una mayor distancia radial R’ (inferior a un radio R” de la superficie anterior). Por tanto, para tamaños de apertura (pupila) pequeños, las propiedades de visión de cerca, intermedia y de lejos de la lente se determinan principalmente por el patrón de difracción trifocal. A medida que aumenta el tamaño de apertura (pupila), las propiedades de la lente se dictan principalmente por el patrón de difracción bifocal. En esta forma de realización, a medida que aumenta el tamaño de apertura, aumenta la fracción de energía óptica dirigida hacia los focos cercano y lejano en relación a la dirigida hacia el foco intermedio. Además, como se indicó anteriormente, la apodización de las alturas de escalón de las zonas de difracción bifocales da como resultado un aumento en la energía óptica dirigida hacia el foco lejano en relación al foco cercano, a medida que aumenta el tamaño de apertura. Generalmente, el radio de la óptica (R”) se selecciona para estar en un intervalo de aproximadamente 2,5 a aproximadamente 3,5 milímetros, encontrándose el radio del patrón trifocal (R) en un intervalo de aproximadamente 1 a aproximadamente 1,5 milímetros y el del patrón bifocal (R’) en un intervalo de aproximadamente 1,5 a aproximadamente 2 milímetros (aunque también pueden emplearse otros valores). Además, aunque en la presente memoria, por motivos de claridad, sólo se ilustran algunas zonas anulares, el número de zonas anulares en cada uno de los patrones trifocal y bifocal puede estar en general en un intervalo de aproximadamente 3 a aproximadamente 30, y puede ser mayor basándose en el aumento de la potencia añadida.

La potencia óptica asociada con el foco lejano puede estar, por ejemplo, en un intervalo de aproximadamente 6 a aproximadamente 34 dioptrías. El foco intermedio puede proporcionar una potencia añadida en un intervalo de aproximadamente 1,5 a aproximadamente 4,5 dioptrías, y el foco cercano puede proporcionar una potencia añadida en un intervalo de aproximadamente 3 a aproximadamente 9 dioptrías.

Por tanto, la lente IOL trifocal 10 anterior proporciona visión de lejos para visualizar objetos a distancias que oscilan, por ejemplo, entre aproximadamente la infinidad y aproximadamente 4 metros (m), y visión de cerca para visualizar objetos, a distancias inferiores a, por ejemplo, aproximadamente 0,4 m. Además, la IOL 10 proporciona visión intermedia para visualizar objetos a distancias en un intervalo de, por ejemplo, aproximadamente 0,4 a aproximadamente 4 m (y en algunas formas de realización en un intervalo de aproximadamente 0,4 a aproximadamente 1 m). Dicho de otro modo, la lente oftálmica trifocal anterior proporciona ventajosamente un grado de acomodación (normalmente denominado pseudoacomodación) para tres intervalos de distancia. Como ilustración adicional, como se muestra esquemáticamente en la figura 4A, cuando la IOL trifocal se implanta en el ojo de un paciente, la potencia combinada de la córnea del ojo y la potencia cercana, intermedia y lejana de la IOL permiten enfocar la luz que sale de los objetos A, B, y C, ubicados, respectivamente, dentro de un intervalo de distancia cercano, intermedio y lejano 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 añadidas, que están dispuestos en una superficie de la misma de modo que proporcionan en conjunto 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 de difracción 11, formadas por dos patrones bifocales diferentes, dispuestas en una parte de una superficie anterior 13 de una lente trifocal 15 según otra forma de realización de la invención. De manera similar a la forma de realización anterior, la superficie anterior se caracteriza por un perfil de base (no mostrado) que proporciona una potencia de foco lejano correspondiente al orden de difracción 0-ésimo de cada patrón. Más específicamente, las zonas de difracción internas 11a, 11b, y 11c forman un patrón bifocal que proporciona una potencia añadida seleccionada, por ejemplo, una potencia añadida en un intervalo de aproximadamente 3 a aproximadamente 9 dioptrías, mientras que las zonas de difracción 11d, 11e, 11f, y 11g forman otro patrón bifocal que proporciona una potencia añadida diferente, por ejemplo, una potencia añadida en un intervalo de aproximadamente 1,5 a aproximadamente 4,5 dioptrías (las zonas de difracción se muestran sólo con fines de ilustración y no están dibujadas necesariamente a escala). Aunque en esta forma de

realización, el patrón bifocal interno muestra una potencia añadida superior a la del patrón bifocal externo, en otras formas de realización, el patrón externo proporciona una mayor potencia añadida. Además, aunque sólo se ilustran algunas zonas de difracción, en muchas formas de realización, el número de zonas de difracción en cada patrón puede oscilar entre aproximadamente 3 y aproximadamente 30, o cualquier otro número adecuado. Las alturas de escalón en los límites de zona pueden ser uniformes o no uniformes y pueden seleccionarse, por ejemplo, de la manera comentada anteriormente. La potencia añadida de cada zona puede establecerse seleccionando las ubicaciones de sus límites de zona (es decir, la distancia radial de cada zona de difracción en el patrón) según la siguiente relación:

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

en la que

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

λ indica la longitud de onda de diseño, y

f indica una potencia añadida.

En esta forma de realización a modo de ejemplo, el patrón bifocal externo muestra una potencia añadida mayor que la del patrón bifocal interno. Por ejemplo, los patrones bifocales externo e interno pueden proporcionar, respectivamente, una potencia añadida de aproximadamente 4D y aproximadamente 2D correspondiente a sus órdenes de difracción +1. Los órdenes de difracción 0-ésimos de los dos patrones son, sin embargo, sustancialmente coincidentes y dirigen la luz incidente a una región focal lejana caracterizada por una potencia seleccionada (basándose en la curvatura de la superficie de la óptica y su índice de refracción) en un intervalo de aproximadamente 6 a aproximadamente 34 dioptrías. Como se muestra esquemáticamente en la figura 4C, el patrón externo proporciona un foco lejano A1 y un foco cercano A2 mientras que el patrón interno proporciona un foco lejano B1 (sustancialmente coincidente con A1) y un foco cercano B2. Por tanto, los dos patrones proporcionan en conjunto un foco lejano, intermedio y cercano, proporcionando el foco cercano de los patrones interno y externo, respectivamente, visión de cerca e intermedia.

Las figuras 5A y 5B ilustran esquemáticamente una lente oftálmica trifocal 30, por ejemplo, una IOL, según otra forma de realización de la invención que incluye una óptica 32 que presenta una superficie anterior 34 y una superficie posterior 36. El perfil de referencia de la superficie anterior 34 está caracterizado por una curva de base 38 adaptada para proporcionar una potencia de foco lejano. La superficie anterior 34 incluye además una pluralidad de zonas de difracción anulares 40, formadas por una pluralidad de estructuras de difracción microscópicas 42, que están dispuestas de manera simétrica alrededor de un eje óptico 44 de la óptica. De manera similar a las formas de realización anteriores, la óptica puede estar formada de un material biocompatible, y la lente puede incluir además una háptica (no mostrada) que facilita su fijación en el ojo. Además, aunque las superficies 14 y 16 en esta forma de realización son generalmente cóncavas, en otras formas de realización, las curvaturas de superficie pueden seleccionarse para proporcionar una lente de plano convexo o plano cóncavo.

Cada zona de difracción anular está separada de una zona adyacente por un escalón (por ejemplo, el escalón 50 que separa la segunda zona de la tercera zona). Los escalones están colocados en los límites radiales de las zonas. En esta forma de realización, las alturas de escalón son sustancialmente uniformes, aunque en otras formas de realización pueden estar apodizadas, por ejemplo, de la manera comentada anteriormente.

A diferencia de las lentes de difracción convencionales en las que las zonas de difracción presentan áreas sustancialmente uniformes, en esta forma de realización, las áreas de las zonas de difracción varían, de una manera controlada, en función de la distancia con respecto al eje óptico 44. Esta variación está diseñada para expandir suficientemente los perfiles de energía óptica en un foco cercano y uno lejano, generados por dos órdenes de difracción de las zonas de difracción, para proporcionar una visión intermedia conservando sustancialmente al mismo tiempo los focos cercano y lejano. Por ejemplo, con referencia a la figura 5B, en esta forma de realización, las áreas de las zonas de difracción anulares 40 aumentan progresivamente en función del aumento de la distancia con respecto al eje óptico. Por ejemplo, la diferencia máxima entre áreas de dos zonas de difracción (por ejemplo, la diferencia en las áreas de las zonas más externas e internas puede ser aproximadamente del 75% o más, por ejemplo, de hasta aproximadamente el 200%).

La variación de las áreas de zona de difracción puede implementarse seleccionando un radio al cuadrado de cada zona en función del número de esa zona, enumerándose consecutivamente las zonas radialmente hacia fuera con respecto al eje óptico, por ejemplo, de la manera descrita más abajo. A modo de ejemplo, la figura 6 proporciona gráficos que comparan una relación (gráfico A) entre los radios al cuadrado de las zonas (r_i^2 indica el radio al cuadrado de la zona i-ésima) y los números de zona, que se emplean normalmente en las lentes de difracción convencionales, con una relación diferente (gráfico B) utilizada en esta forma de realización de una lente oftálmica

trifocal de la invención. Como se indica en los gráficos, en la lente trifocal, los radios al cuadrado de las zonas muestran un grado seleccionado de variación no lineal en función de los números de zona mientras que los radios al cuadrado de las zonas de lente que presentan áreas de difracción uniformes varían de manera lineal en función de los respectivos números de zona. Esto modifica el patrón de interferencia de luz difractada por la lente para desviar más energía a una región focal intermedia.

Más específicamente, en la presente forma de realización, la ubicación radial de un límite de zona puede determinarse según la siguiente relación:

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

en la que

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

λ indica la longitud de onda de diseño,

f indica una longitud focal del foco cercano, y

g(i) indica una función no constante.

En esta forma de realización, la función *g(i)* se define según la siguiente relación:

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

en la que

i indica el número de zona,

a y *b* son dos parámetros ajustables, y

f indica la longitud focal del foco cercano. A modo de ejemplo, *a* puede estar en un intervalo de aproximadamente 0,1 λ a aproximadamente 0,3 λ, y *b* puede estar en un intervalo de aproximadamente 1,5 λ a aproximadamente 2,5 λ, donde λ indica la longitud de onda de diseño.

Como se indicó anteriormente, la variación de las áreas de las zonas de difracción en función de la distancia con respecto al eje óptico da como resultado una desviación de parte de la luz difractada a una región focal intermedia para proporcionar visión intermedia. Por ejemplo, una fracción de la luz difractada en un intervalo de aproximadamente el 10% a aproximadamente el 28% puede dirigirse a la región focal intermedia.

A modo de ejemplo, la figura 7 presenta dos gráficos (C y D) que ilustran esquemáticamente la mejora de agudeza visual para visión intermedia proporcionada por la lente oftálmica trifocal a modo de ejemplo anterior. Más específicamente, el gráfico C (líneas discontinuas) muestra la distribución de energía óptica entre un foco cercano y uno lejano de una lente de difracción convencional en la que las zonas de difracción anulares presentan áreas iguales. Por el contrario, el gráfico D muestra esquemáticamente la distribución de energía óptica en una lente oftálmica según una forma de realización de la invención en la que por lo menos dos o más de las zonas de difracción presentan áreas diferentes. Una comparación del gráfico D con el gráfico C muestra que una forma de realización de una lente oftálmica de la invención que presenta zonas de difracción con áreas diferentes proporciona una mejora considerable de la agudeza visual para visión intermedia, conservando sustancialmente al mismo tiempo el rendimiento visual en la visión de cerca y de lejos. A modo de ejemplo, en muchas formas de realización, la eficiencia de difracción en cada uno de los focos cercano y lejano puede estar en un intervalo de aproximadamente el 28% a aproximadamente el 38%, encontrándose la eficiencia de difracción en el foco intermedio en un intervalo de aproximadamente el 10% a aproximadamente el 28%.

De manera similar a la forma de realización anterior, la potencia óptica asociada con el foco lejano puede estar, por ejemplo, en un intervalo de aproximadamente 6 a aproximadamente 34 dioptrías proporcionando el foco cercano una potencia añadida en un intervalo de aproximadamente 3 a aproximadamente 9 dioptrías. Además, el foco intermedio puede proporcionar, por ejemplo, una potencia añadida en un intervalo de aproximadamente 1,5 a aproximadamente 4,5 dioptrías con respecto al foco lejano.

La funcionalidad de las lentes trifocales anteriores puede entenderse quizás mejor considerando el diagrama mostrado en la figura 8, que ilustra el retardo de fase óptica (OPD) asociado con tres órdenes de difracción (es decir, +1, 0, y -1) de una lente de difracción multifocal a través de dos zonas de difracción, en función del cuadrado de la distancia radial con respecto al eje óptico. Los retardos de fase asociados con +1 y -1 varían sustancialmente de manera lineal, mientras que el asociado con el orden 0-ésimo permanece sustancialmente constante, a medida que

el cuadrado de la distancia radial cambia de cero a un valor correspondiente al límite de la primera zona de difracción con la segunda (indicado en la presente memoria con ZB12). En el límite de zona, la fase óptica asociada con cada orden muestra una discontinuidad. Aunque no se muestra, se produce una discontinuidad de fase similar en el límite de la segunda zona con la tercera (indicado con ZB23), etc. Si los límites de zona están situados en posiciones radiales al cuadrado correspondientes a un cambio de fase óptica π a través de cada zona de difracción, la energía óptica difractada al orden 0-ésimo desaparece sustancialmente. Dicho de otro modo, la lente proporciona de manera eficaz sólo dos órdenes de difracción (foco cercano y lejano). Sin embargo, en muchas formas de realización de la invención, las ubicaciones radiales al cuadrado de uno o más límites de zona de difracción se seleccionan de modo que el cambio de fase óptica a través de una zona de difracción es menor que π (por ejemplo, es $\pi/4$). Esto lleva a una desviación de parte de la energía óptica difractada en el orden 0-ésimo, proporcionando así visión intermedia.

En algunas formas de realización, la visión a distancia proporcionada por la lente oftálmica trifocal se mejora mediante corrección de aberraciones para aperturas grandes (por ejemplo, tamaños de apertura mayores de aproximadamente 3 mm en diámetro, aunque en algunas formas de realización la corrección de aberraciones también puede utilizarse para tamaños de apertura menores). Tal corrección de aberraciones puede contrarrestar, por ejemplo, la luz desenfocada, en caso de existir, que puede aparecer en el foco lejano como resultado de un aumento de luz en la región focal intermedia. Por ejemplo, el perfil (curva) de base de la superficie anterior puede seleccionarse para presentar cierto grado de asfericidad con el fin de reducir efectos de aberración esférica, que pueden ser particularmente pronunciados para aperturas grandes. En la solicitud de patente estadounidense en tramitación junto con la presente mencionada anteriormente titulada “Apodized aspheric diffractive lenses” se dan a conocer algunos ejemplos de tales perfiles asféricos adecuados para su utilización en la puesta en práctica de la invención.

A modo de ejemplo, el perfil esférico de la superficie anterior en función de la distancia radial (R) con respecto al eje óptico de la lente puede caracterizarse por la siguiente relación:

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

en la que,

z indica una combadura de la superficie en paralelo a un eje (z), por ejemplo, el eje óptico, perpendicular a la superficie,

c indica una curvatura en el vértice de la superficie,

cc indica un coeficiente cónico,

R indica una posición radial de la superficie,

ad indica un coeficiente de deformación de cuarto orden, y

ae indica un coeficiente de deformación de sexto orden.

Los expertos en la materia apreciarán que pueden realizarse diversas modificaciones de las formas de realización anteriores sin apartarse del alcance de la invención.

REIVINDICACIONES

1. Lente oftálmica multifocal (10, 15), que comprende

una óptica (12) que presenta por lo menos una superficie óptica (14, 16), y

una pluralidad de zonas de difracción (11) dispuestas concéntricamente alrededor de un eje óptico (18) de la óptica, presentando por lo menos dos de dichas zonas de difracción unas áreas diferentes (11a-c; 11d-g),

caracterizada por que cada una de entre una zona interna (11a-c) y una zona externa (11d-g) de difracción dirige energía de luz incidente respectivamente hacia un foco cercano (A1, B1) y un foco lejano (A2, B2) pero las zonas proporcionan en conjunto unos focos lejano (A2, B2), intermedio (B1) y cercano (A1), proporcionando los focos cercanos (A1, B1) de los patrones interno y externo respectivamente, visión de cerca e intermedia, dando como resultado la variación de las áreas de las zonas de difracción (11a-c;11d-g) en función de la distancia con respecto al eje óptico (18) una desviación de parte de la luz difractada a dicho foco intermedio, y siendo la fracción de energía de luz incidente que es dirigida hacia cada uno de los focos cercano y lejano resultantes mayor que la fracción de energía de luz incidente que es dirigida hacia el foco intermedio resultante, recibiendo el foco intermedio entre 10 y 28% de la energía de luz incidente, y siendo las áreas diferentes (11a-c;11d-g) seleccionadas de tal modo que la fracción de energía de luz incidente dirigida hacia el foco cercano y lejano sea diferente en proporción a una diferencia en las áreas.

2. Lente oftálmica multifocal según la reivindicación 1, en la que las zonas de difracción (11) muestran áreas que aumentan en función del aumento de la distancia con respecto al eje óptico (18).

3. Lente oftálmica multifocal según la reivindicación 1, en la que las zonas de difracción (11) comprenden unas zonas anulares (11a-g) caracterizadas por que presentan un radio (r_i) con respecto al eje óptico (18),

en la que un cuadrado del radio de una zona está definido por la siguiente relación:

$$r_i^2 = (2i+1)\lambda f + g(i)$$

en la que i indica un número de zona, r_i^2 indica un radio al cuadrado de esa zona, y *f* indica una potencia añadida del foco cercano con respecto al foco lejano, λ indica una longitud de onda de diseño, y *g(i)* indica una función no constante de *i,* y en la que *g(i)* está definida por la siguiente relación:

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

en la que *i* indica el número de zona, *a* y *b* son dos parámetros ajustables, y *f* indica la longitud focal del foco cercano,

y en la que dicho parámetro ajustable *a* está en un intervalo comprendido entre 0,1 λ y 0,3 λ, y opcionalmente, en la que dicho parámetro ajustable b está en un intervalo comprendido entre 1,5 λ y 2,5 λ.

4. Lente multifocal según la reivindicación 1, en la que dicha óptica (12) dirige por lo menos aproximadamente el 25%, preferentemente por lo menos aproximadamente el 28%, de energía de luz incidente hacia cada uno de entre dichos focos cercano y lejano resultantes.

5. Lente multifocal según la reivindicación 4, en la que dicha óptica (12) dirige por lo menos aproximadamente el 10% de energía de luz incidente hacia dicho foco intermedio resultante.

6. Lente multifocal según la reivindicación 1, en la que la fracción de energía de luz incidente dirigida hacia cada uno de entre los focos cercano y lejano resultantes con respecto a la dirigida hacia el foco intermedio resultante está en un intervalo comprendido entre 1,4 y 4.

7. Lente multifocal según la reivindicación 1, en la que dicha superficie óptica (14, 16) está caracterizada por que presenta una curva de base (22) que genera una potencia de refracción correspondiente a dicho foco lejano resultante.

8. Lente multifocal según la reivindicación 1, en la que dicho foco cercano resultante está caracterizado por que presenta una potencia añadida en un intervalo comprendido entre 3 y 9 dioptrías con respecto a dicho foco lejano resultante.

9. Lente oftálmica multifocal según la reivindicación 1, en la que una de dichas dos zonas (11a-c;11d-g) presenta un área mayor que un área de la otra zona en un factor en un intervalo comprendido entre aproximadamente el 75% y aproximadamente el 200%.

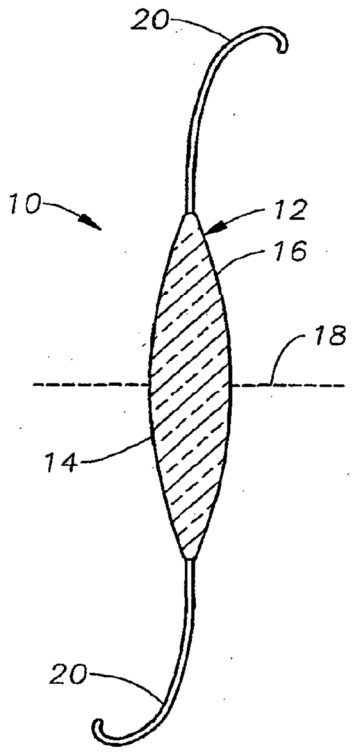

Fig. 1A

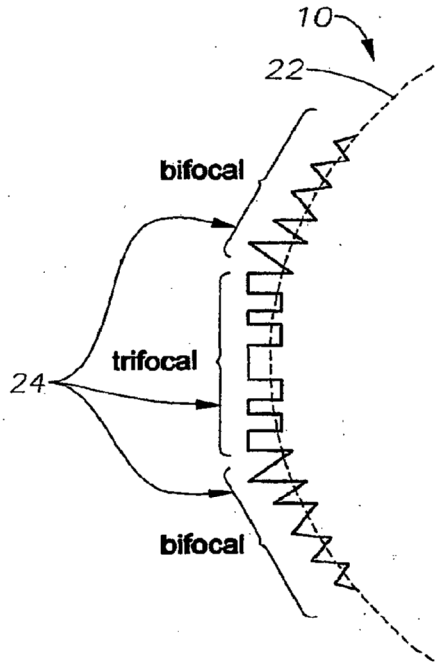

Fig. 1B

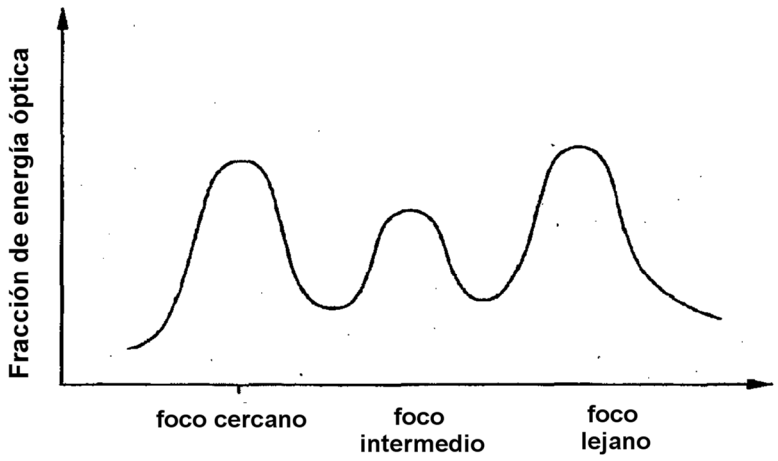

Fig. 3

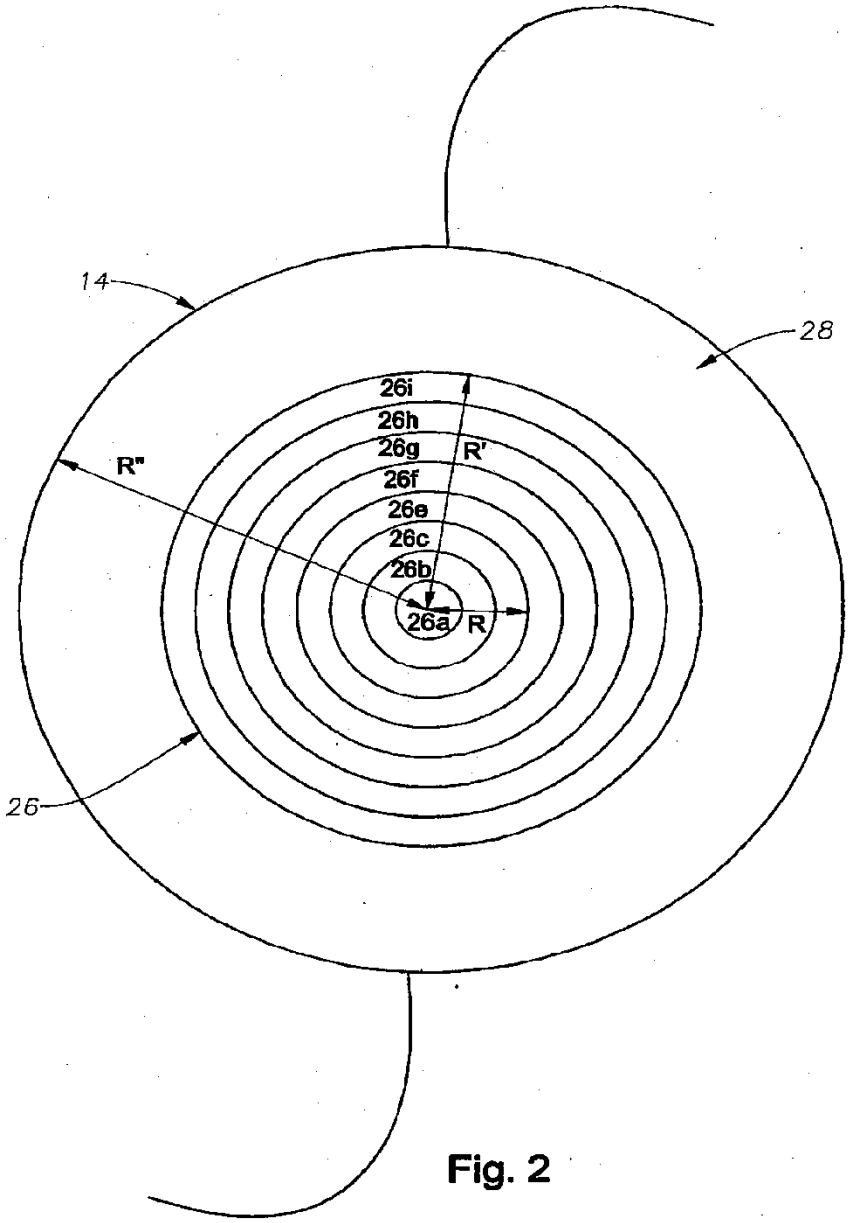

Fig. 2

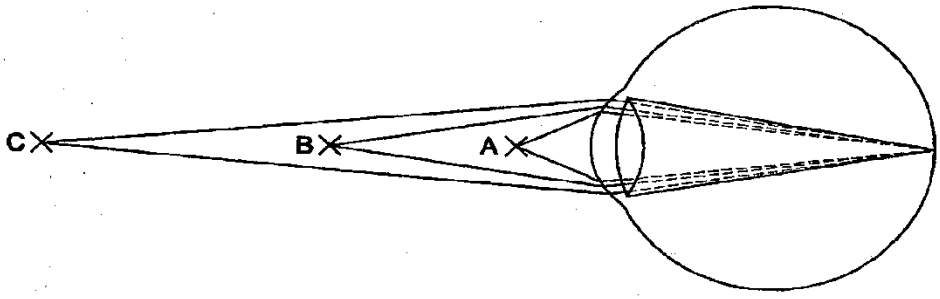

Fig. 4A

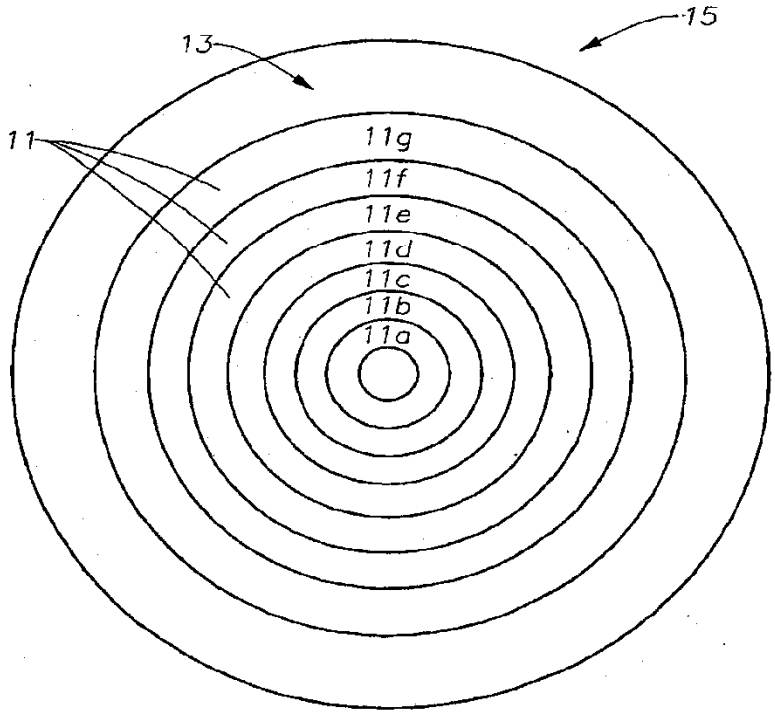

Fig. 4B

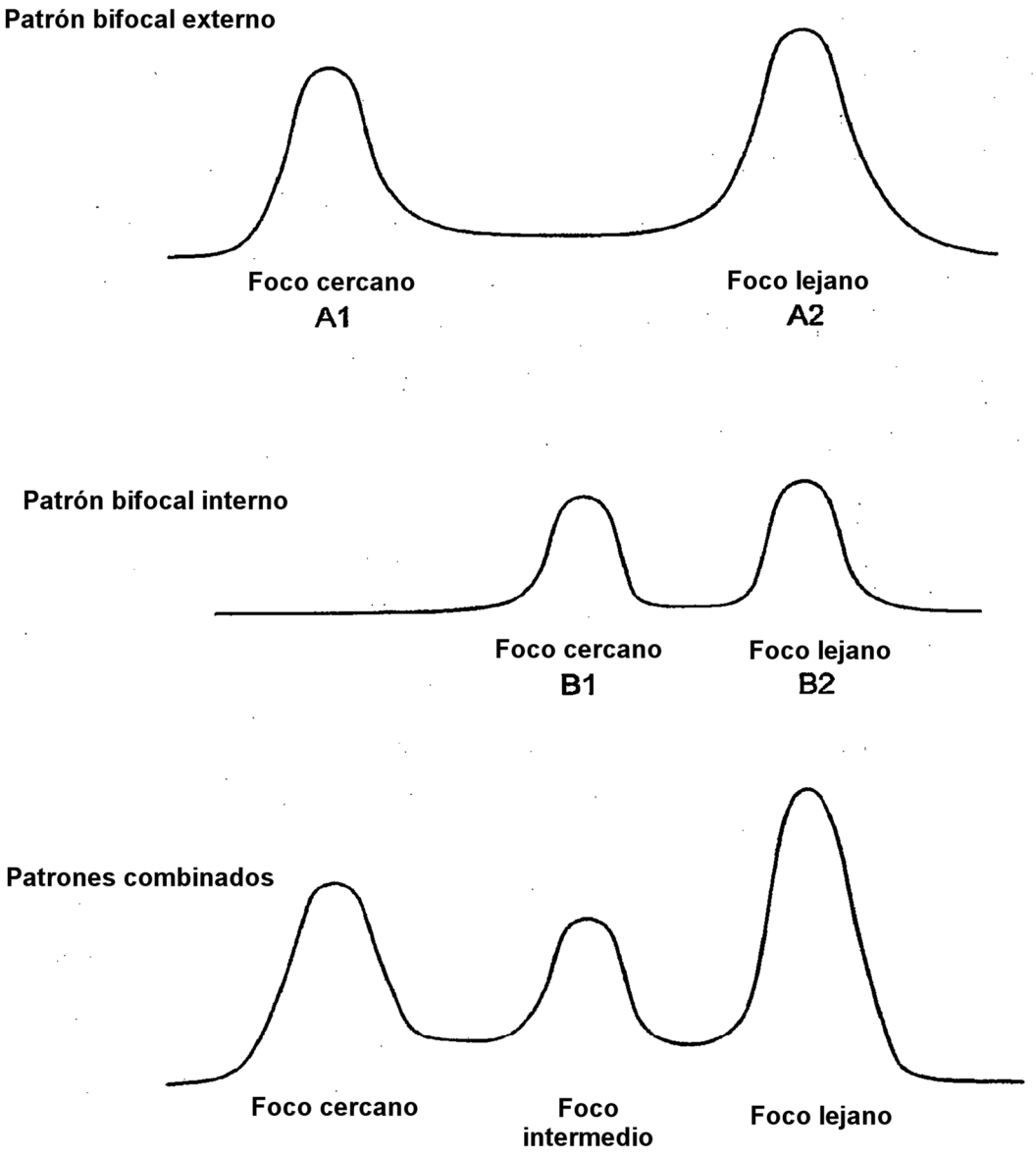
Patrón bifocal externo
Foco cercano
A1
Foco lejano
A2
Patrón bifocal interno
Foco cercano
B1
Foco lejano
B2
Patrones combinados
Foco cercano
Foco intermedio
Foco lejano

Fig. 4C

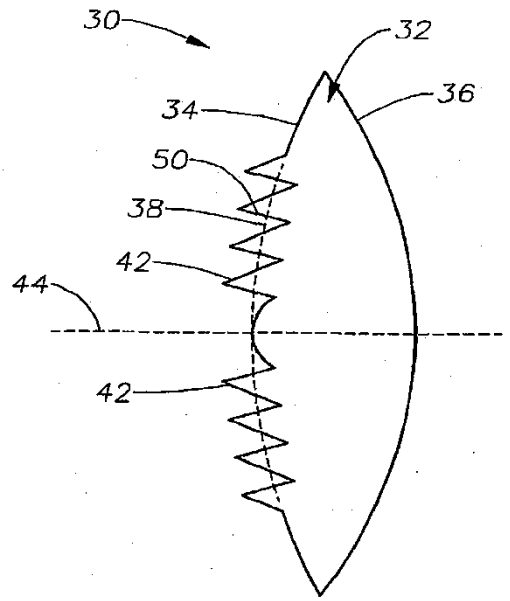

Fig. 5A

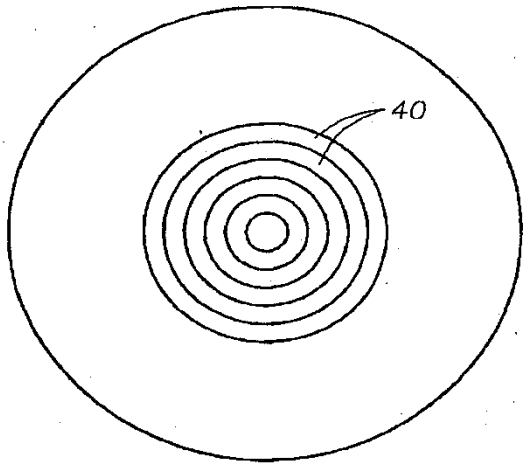

Fig. 5B

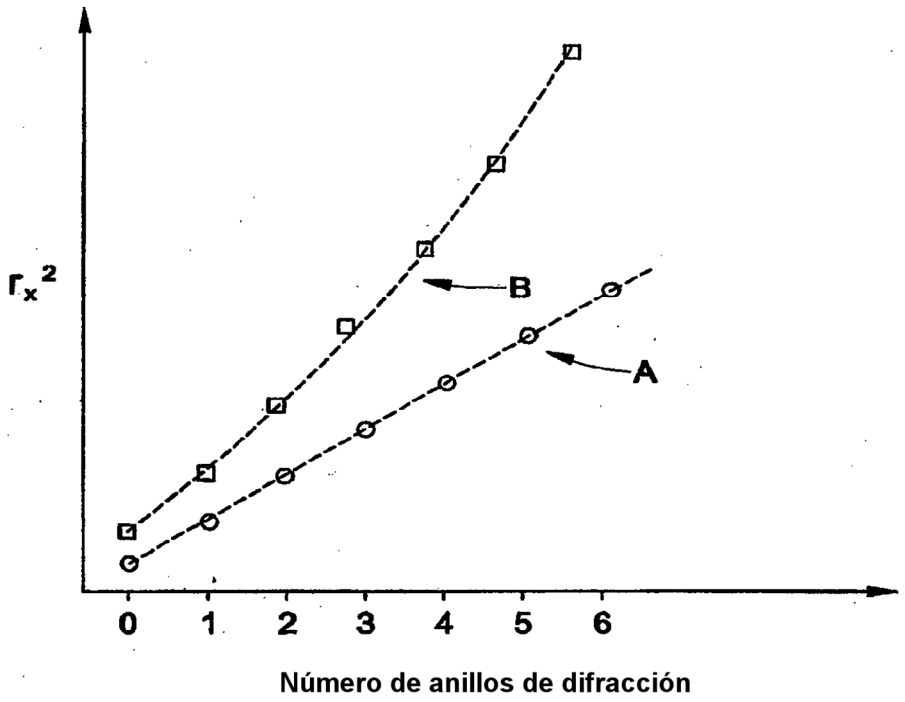
r_x^2
B
A
0
1
2
3
4
5
6
Número de anillos de difracción

Fig. 6

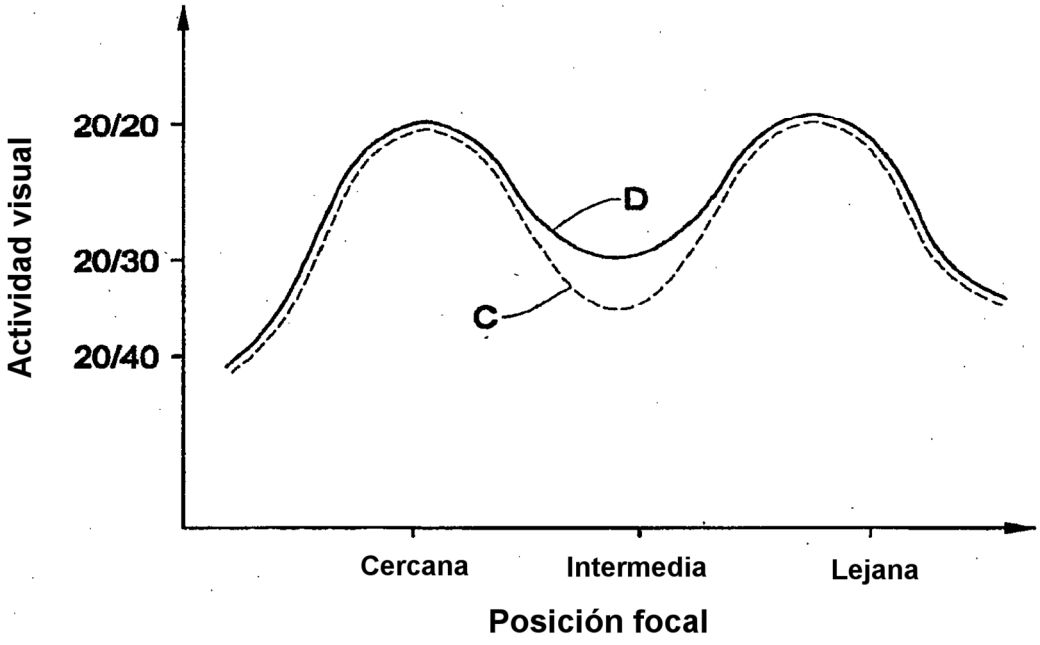
Actividad visual
20/20
20/30
20/40
D
C
Cercana
Intermedia
Lejana
Posición focal

Fig. 7

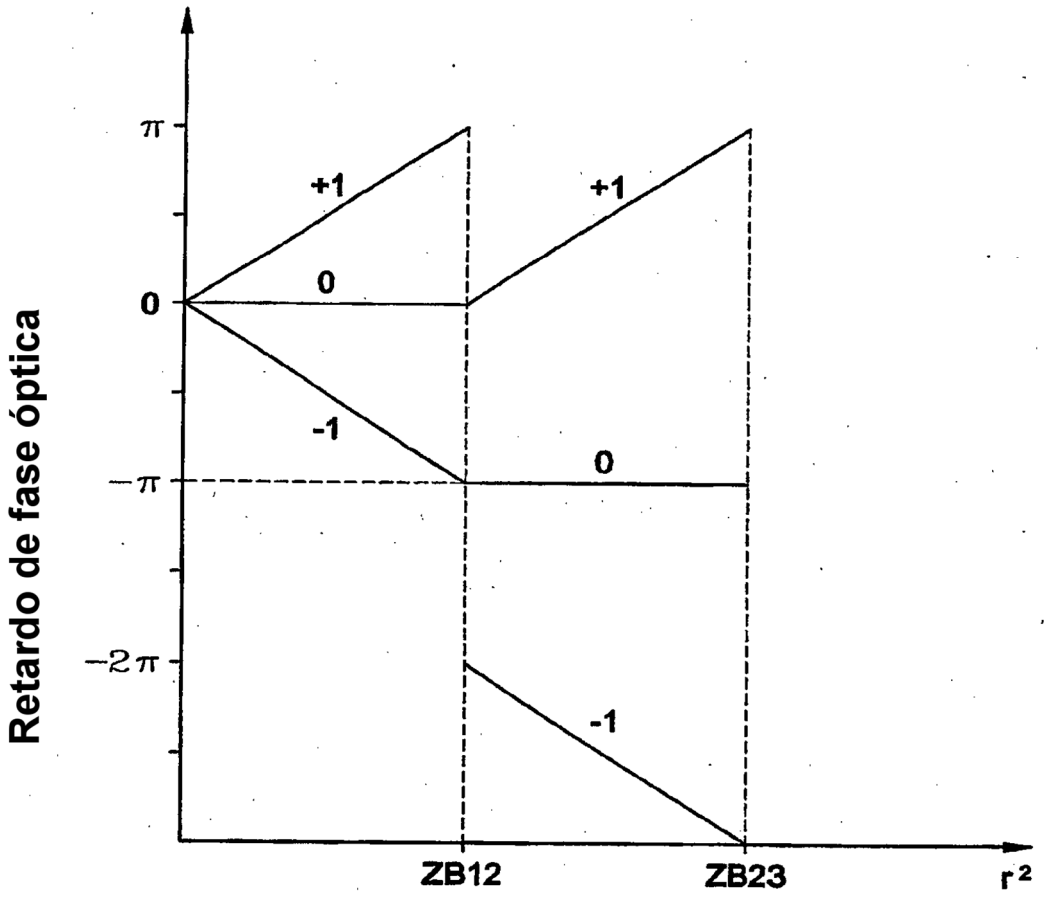

Fig. 8