

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 809 181**

51 Int. Cl.:

G02B 3/10 (2006.01)
A61F 2/12 (2006.01)
G02C 7/06 (2006.01)
G02C 7/04 (2006.01)
G02B 5/18 (2006.01)
A61F 2/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.02.2010 PCT/US2010/024165**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.08.2010 WO10093975**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.02.2010 E 10741835 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.04.2020 EP 2396683**

54 Título: **Lente trifocal difractiva**

30 Prioridad:

12.02.2009 US 207409 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
03.03.2021

73 Titular/es:

**THE ARIZONA BOARD OF REGENTS ON BEHALF
OF THE UNIVERSITY OF ARIZONA (100.0%)
University Services Bldg. Room 204 888 N. Euclid
Avenue P.O. Box 210158
Tucson, AZ 85721-0158, US**

72 Inventor/es:

SCHWIEGERLING, JAMES, T.

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 809 181 T3

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

DESCRIPCIÓN

Lente trifocal difractiva

Campo técnico

La presente invención se refiere en general al campo de las lentes intraoculares y de contacto multifocales correctoras.

5 Antecedentes

Las lentes de contacto bifocales y trifocales se usan comúnmente para tratar la presbicia, un estado en el que el ojo muestra una disminución progresiva de la capacidad para enfocar objetos cercanos. Los seres humanos padecen presbicia debido al envejecimiento, y el efecto generalmente se hace perceptible a partir de los 40-45 años, cuando descubren que necesitan gafas de lectura. Las personas con presbicia que usan lentes correctoras pueden darse cuenta entonces de que necesitan dos prescripciones independientes, preferiblemente dentro de la misma lente bifocal, una para leer (de cerca) y otra para conducir (de lejos). Una lente trifocal mejora adicionalmente la visión a distancias intermedias, por ejemplo, cuando se trabaja en un ordenador. Una lente intraocular (LIO) es una lente sustitutiva artificial que se puede usar como alternativa a una lente de contacto o a unas gafas. A menudo, durante la cirugía de cataratas se implanta una LIO en lugar del cristalino natural. Una lente intracorneal (LIC) es una lente artificial que se implanta en la córnea.

Las ópticas correctoras convencionales consisten normalmente en lentes refractivas, lo que significa que se doblan y enfocan los rayos de luz reflejados desde un objeto para formar una imagen enfocada del objeto en la retina. La refracción de los rayos de luz se rige por la ley de Snell, que describe el grado de refracción que se produce cuando los rayos de luz cruzan el límite de dos materiales con índices de refracción distintos.

Las lentes difractivas tienen una estructura repetitiva que se puede formar en la superficie de un elemento óptico mediante un método de fabricación tal como, por ejemplo, corte de la superficie utilizando un torno que puede estar equipado con un cabezal de corte hecho de un mineral duro, como diamante o zafiro; modelado de escritura directa utilizando un haz de alta energía, como un rayo láser o haz de electrones o un método similar de eliminación de material de la superficie; grabado de la superficie mediante un proceso de diseño fotolitográfico; o moldeo de la superficie. La estructura difractiva consiste por regla general en una serie de zonas anulares concéntricas, debiendo ser cada zona progresivamente más estrecha desde el centro hasta el borde de la lente. Puede haber, por ejemplo, 20-30 zonas entre el centro y el borde de la lente. El perfil de la superficie dentro de cada zona consiste generalmente en una función que varía suavemente, como un arco, una parábola o una línea. En la periferia exterior de cada zona hay un escalón discreto en el perfil de superficie vertical, midiendo la altura del escalón por regla general aproximadamente 0,5-3 micras. La estructura superficial resultante actúa como una red de difracción circularmente simétrica que dispersa la luz en múltiples órdenes de difracción, teniendo cada orden de difracción un número consecutivo, cero, uno, dos, y así sucesivamente.

La "eficiencia de difracción" se refiere al porcentaje de potencia de luz incidente transmitida en cada uno de los diversos órdenes de difracción que comprende el patrón de difracción en el plano focal. Si las zonas tienen áreas de superficie iguales y son radialmente simétricas, enfocan la luz de diferentes órdenes de difracción en el eje óptico de la lente, teniendo cada orden de difracción sus propios focos distintos. Por lo tanto, la lente difractiva actúa como una lente multifocal que tiene muchos focos discretos. Por ejemplo, una lente bifocal difractiva proporciona simultáneamente imágenes retinianas nítidas de objetos a dos distancias diferentes, así como dos imágenes desenfocadas correspondientes. El sistema visual humano tiene la capacidad de seleccionar entre las diferentes imágenes retinianas, lo que permite una visión multifocal simultánea utilizando una sola lente difractiva.

Las lentes difractivas se pueden usar como lentes de contacto y LIO para corregir la presbicia. En dicha aplicación, la lente comprende una superficie refractiva y una superficie difractiva. En la práctica, la energía luminosa que pasa a través de una lente difractiva generalmente se concentra en uno, dos o tres órdenes de difracción, mientras que aporta una cantidad insignificante de energía luminosa a otros órdenes de difracción. Con respecto a las lentes correctoras difractivas, por ejemplo, una alta eficiencia de difracción para el orden cero implica una mayor mejora de la visibilidad a largas distancias. La cantidad de energía óptica dirigida a cada orden de difracción se rige por las alturas de los escalones zonales. Un diseñador de lentes puede elegir, para las características de superficie difractiva de una lente bifocal, alturas de escalón para introducir, por ejemplo, un cambio de fase de media longitud de onda entre zonas adyacentes, que dirige aproximadamente un 40% de la luz incidente al orden de difracción cero, correspondiente a la visión de lejos, y un 40% al primer orden de difracción positivo, correspondiente a la visión de cerca. El 20% restante de la luz incidente en una lente bifocal convencional se dirige a otros órdenes de difracción que no son útiles para la visión. Los diseños existentes para lentes intraoculares y de contacto multifocales usan óptica refractiva, una combinación de diseño refractivo/difractivo, o lentes difractivas que dirigen la luz a un solo orden de difracción. Por ejemplo, la patente de EE. UU. nº 5,344,447 de Swanson, describe un diseño de LIO trifocal que mejora la visión de lejos utilizando una lente combinada que tiene una superficie refractiva y una superficie difractiva. En este caso, cada zona difractiva corresponde a un escalón binario. Esta lente distribuye la luz aproximadamente por igual entre el primer orden de difracción positivo, el orden de difracción cero y el primer orden de difracción negativo. Sin embargo, un inconveniente de esta configuración consiste en que el exceso de luz se dirige a otros órdenes de difracción superiores,

lo que reduce la calidad visual. Además, esta configuración hace que la potencia de la lente portadora subyacente sea más difícil de predecir porque la visión de lejos se rige por una combinación de la potencia refractiva de la lente con la potencia difractiva del orden de difracción menos uno. Ninguna de las alternativas existentes logra dirigir suficiente luz a un orden de difracción correspondiente a una distancia focal intermedia y, por lo tanto, las lentes de contacto y LIO trifocales no funcionan igual de bien en todo el rango focal. Por ejemplo, la patente de EE. UU. nº 7,441,894 de Zhang et al. describe una lente intraocular trifocal que tiene zonas difractivas con áreas variables capaces de dirigir aproximadamente un 25-28% de la luz incidente a los focos de cerca y de lejos, pero solo aproximadamente un 10% de la luz incidente se dirige al foco intermedio.

Con referencia a D1, el documento US 5122903 describe un dispositivo óptico y un dispositivo de captación óptica que utiliza el mismo. Se describe un elemento óptico que tiene un sustrato y un patrón de red compuesta formado sobre éste. El patrón consiste en dos tipos diferentes de patrones de red superpuestos sobre el sustrato. Cuando uno de los dos tipos de patrones de red está formado en un patrón de lente de Fresnel, se implementa una función de enfoque o colimación de la luz (es decir, una función de lente). Cuando el otro patrón está formado en un patrón de red lineal con separación uniforme, el elemento óptico desarrolla la función de lente y una función para difractar luces a través de la red lineal. Cuando uno de los dos tipos de patrones de red está formado en un patrón de lente de Fresnel y el otro patrón está implementado en un patrón de red lineal con separación uniforme, se obtienen una función de lente para enfocar luces en un punto y una función de lente cilíndrica para enfocar luces en un contorno lineal. Por consiguiente, cuando luces paralelas inciden sobre el elemento óptico, se produce astigmatismo.

El documento US 4 210 391 A describe una construcción de lente de Fresnel multifocal adecuada para utilizarla en sistemas ópticos con requisitos multifocales. Está diseñada como una placa de zona multifocal para posibilitar una construcción de anillo anular cuya anchura no está limitada por aberraciones de difracción. Esto se lleva a cabo modificando los anillos anulares de separación de fases de una placa de zona, con facetas ópticas curvadas o inclinadas con índices de refracción variables, que entonces pueden actuar como anillos de Fresnel correspondientes a las diferentes potencias focales deseadas.

Compendio

Se describe una lente multifocal difractiva tal como se expone en las reivindicaciones adjuntas, que comprende un elemento óptico que tiene al menos una superficie difractiva, cuyo perfil de superficie comprende una pluralidad de zonas anulares concéntricas. El espesor óptico del perfil de la superficie radial cambia monótonamente dentro de cada zona. En la periferia exterior de cada zona se produce un escalón distinto en el espesor óptico, cuyo tamaño se designa como "altura de escalón". Las alturas de escalón de zonas adyacentes difieren periódicamente de una zona a otra para adaptar las eficiencias de orden de difracción del elemento óptico. Existe un interés particular en aumentar al menos la eficiencia del primer orden de difracción del elemento óptico para abordar la visión de distancia intermedia para lentes trifocales.

En un ejemplo de una lente trifocal, las alturas de escalón alternan entre dos valores, siendo las alturas de escalón pares menores que las alturas de escalón impares. En realizaciones alternativas, las alturas de escalón pares pueden ser mayores que las alturas de escalón impares, o las alturas de escalón sucesivas pueden alternar entre tres o más valores. En otra realización más, el patrón de alturas de escalón cambia gradualmente desde el centro hasta el borde de la lente. Según una realización de este tipo, el centro de la lente es trifocal, pero se vuelve progresivamente bifocal hacia el borde de la lente. Al modelar y trazar una representación topográfica de las eficiencias de difracción resultantes de dicho perfil de superficie, se pueden seleccionar parámetros de dimensión tales como valores de altura de escalón para lograr dirigir una proporción deseada de potencia de luz a órdenes de difracción designados, mejorando así la eficacia de lejos, intermedia y de cerca de la lente multifocal.

Se ha de entender que este compendio se proporciona como un medio para determinar en general lo que sigue en los dibujos y la descripción detallada, y no pretende limitar el alcance de la invención. Los objetos, características y ventajas de la invención se entenderán fácilmente al considerar la siguiente descripción detallada junto con los dibujos adjuntos.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 muestra una lente intraocular bifocal difractiva de la técnica anterior disponible comercialmente.

La figura 2 es una vista ampliada de la superficie de una zona central de la lente intraocular bifocal difractiva de la técnica anterior mostrada en la figura 1, en la que el centro de la lente se encuentra en la esquina inferior derecha de la imagen.

La figura 3 es un diagrama del cambio de fase óptica introducido por una lente difractiva bifocal convencional de la técnica anterior en función del radio a través de cinco zonas de la lente, que muestra alturas de escalón generalmente iguales.

La figura 4 es una vista en sección transversal del perfil de superficie radial para una estructura difractiva de acuerdo con una realización preferida de una lente difractiva trifocal novedosa, que muestra dos alturas de escalón alternas.

La figura 5 es un diagrama del cambio de fase óptica introducido por la estructura difractiva mostrada en la figura 4, en función del radio, que muestra alturas de escalón alternas correspondientes para cinco zonas representativas.

La figura 6 es una serie de diagramas topográficos bidimensionales generados por ordenador que muestran eficiencias de difracción que resultan de diferentes elecciones de valores para las alturas de escalón alternas en el perfil de fase óptica de la figura 5.

La figura 7 es un diagrama del cambio de fase óptica introducido por una estructura difractiva trifocal/bifocal graduada en función del radio, que muestra alturas de escalón alternas correspondientes.

Descripción detallada de realizaciones de la invención

La presente invención se entenderá fácilmente mediante la siguiente descripción detallada junto con los dibujos adjuntos. Para facilitar esta descripción, los números de referencia iguales designan elementos estructurales similares. En la siguiente descripción se exponen muchos detalles para proporcionar una comprensión de las realizaciones divulgadas de la invención. Sin embargo, al revisar esta divulgación, para un experto en la materia resultará evidente que pueden no ser necesarios todos los detalles divulgados para poner en práctica la invención reivindicada y que se podrían construir realizaciones alternativas sin apartarse de los principios de la invención.

Con referencia a la figura 1, en ella se muestra una lente 100 intraocular bifocal difractiva existente. La lente 100 se conoce comercialmente como un implante de lente ReSTOR® y está disponible en Alcon Laboratories, Inc. de Fort Worth, Texas. El implante de lente comprende un par de prolongaciones 101 conectadas a un elemento óptico central que tiene al menos una superficie óptica 102 en la que se forma un patrón de perfil de difracción dentro de zonas radiales. La figura 2 muestra una vista ampliada de la superficie óptica 102, en la que un patrón de perfil de superficie en general radialmente simétrico para una serie de zonas anulares 104 concéntricas presenta, en la periferia exterior de cada zona, un escalón discreto 106, que tiene una altura 108 de escalón. Las anchuras de las zonas 104 generalmente disminuyen desde el centro hacia el borde de la lente 100, de modo que la anchura 110 de una zona central puede ser significativamente mayor que la anchura 112 de una zona del borde. Las zonas de diferentes anchuras preferiblemente representan áreas de superficie iguales. En general, si la altura 108 de escalón introduce un retardo de fase de 2π , resulta una lente de potencia única, es decir, la lente tendrá un solo foco; si la altura 108 de escalón introduce un retardo de fase diferente a un múltiplo de 2π , se obtiene una lente bifocal.

La figura 3 muestra un perfil radial 120 del cambio de fase óptica que experimenta una onda de luz incidente cuando pasa a través de la lente difractiva 100. El perfil radial 120 se puede lograr mediante estructuras difractivas que generalmente tienen elementos en forma de dientes de sierra, o variando el índice de refracción del material de la lente. La dependencia radial del cambio de fase $\phi(r)$ viene dada por

$$\phi(r) = 2\pi\alpha p [j - r^2/(2p\lambda_0 F_0)]$$

(1)

$$\alpha = \lambda/\lambda_0 [n(\lambda) - n'(\lambda)]/[n(\lambda_0) - n'(\lambda_0)], \text{ para radios } r \text{ dentro de la zona de orden } j$$

(2)

en donde λ_0 es la longitud de onda de diseño, es decir, la longitud de onda en la que se produce un cambio de fase de 2π en cada límite de zona; n es el índice de refracción del material de la lente; F_0 es la distancia focal cuando la longitud de onda de iluminación $\lambda = \lambda_0$; n' es el índice de refracción del material que rodea la lente; y p es un número entero que representa la modulación de fase máxima como un múltiplo de 2π . La sección transversal de la superficie óptica real, correspondiente a las regiones concéntricas 104 mostradas en la figura 2, está relacionada con el perfil de cambio de fase radial. La altura máxima correspondiente del relieve superficial de la superficie óptica 102 está dada por

$$h_{\text{máx}}(r) = p \lambda_0/[n(\lambda_0) - n'(\lambda_0)] \tag{3}$$

y por regla general es de aproximadamente 5 micras.

Con referencia a la figura 3, los elementos del perfil 120 de fase radial tienen una forma de dientes de sierra 122, caracterizada por picos agudos que tienen un borde delantero 124 que se eleva desde un primer valor 125 normalizado a cero, gradualmente hasta un valor máximo 126, y un borde trasero 128 que cae abruptamente desde el valor de pico 126 de vuelta a la altura inicial 125. La anchura 110 del anillo central corresponde al radio del primer pico, y la anchura 112 del anillo del borde corresponde a la distancia entre el cuarto y el quinto pico en este ejemplo, en el que los valores de pico 126 están asociados con alturas de escalón sustancialmente iguales. El perfil de fase radial de la figura 3 está producido por un perfil de superficie, cuyos elementos tienen una forma similar a la de los dientes de sierra 122, y tienen un perfil de espesor óptico asociado que también tiene una forma similar a la de los dientes de sierra 122. Las lentes 100 intraoculares bifocales existentes en esta configuración tienen generalmente eficiencias de difracción de un 40% tanto en el orden de difracción cero como en el primer orden de difracción (distancias lejanas y cercanas, respectivamente), y eficiencias de difracción sustancialmente más pequeñas para órdenes de difracción más altos.

Como resultado de ello, la visión de lejos y de cerca se mejora, pero la visión intermedia es limitada.

La figura 4 muestra una vista en sección transversal de un perfil 130 de superficie física de una estructura difractiva fabricada en una superficie óptica 102 superior de una lente de acuerdo con una realización preferida. Una superficie inferior de la lente, 134, es una superficie refractiva. La anchura radial de cada zona anular difractiva 104 disminuye desde el centro de la lente hasta el borde de la lente para mantener áreas iguales de las zonas difractivas. Las alturas de escalón entre cada zona alternan entre dos valores, comenzando con la altura 136 de escalón más grande para la transición entre la zona central y la primera zona anular. Una altura 138 de escalón menor caracteriza la transición entre la primera y la segunda zonas. Este patrón de alturas de escalón alternantes se repite hasta el borde de la lente.

La figura 5 muestra un diagrama del perfil radial 140 del cambio de fase óptica $\phi(r)$ que experimenta una onda de luz incidente cuando pasa a través de una lente trifocal difractiva mejorada que tiene el perfil de superficie mostrado en la figura 4. Los elementos del perfil radial 140 tienen una forma de dientes de sierra 141 similar a la forma de dientes de sierra 122, en la que cada una de las zonas concéntricas se encuentra en el mismo radio, pero las alturas de escalón no son todas sustancialmente iguales. En lugar de ello, un primer conjunto de picos 142, que tienen alturas 144 de escalón más grandes, se alterna con un segundo conjunto de picos 146, que tienen alturas 148 de escalón más pequeñas. Estas características del perfil de fase corresponden a las alturas 136 y 138 de escalón del perfil de superficie, respectivamente. Alternando las alturas de escalón, la potencia de la luz incidente se puede dirigir a los órdenes de difracción correspondientes a la visión de lejos, intermedia y de cerca. De acuerdo con una realización preferida ejemplificada a continuación, las alturas de escalón impares son mayores que las alturas de escalón pares, aunque en realizaciones alternativas se puede estipular lo contrario mientras se aplique la misma metodología para optimizar el diseño.

La figura 6 muestra nueve diagramas topográficos A - I generados por ordenador de eficiencias de difracción para la potencia de la luz dirigida a los órdenes de difracción cero, +primero y +segundo. Estos órdenes de difracción representan la visión de lejos 152, la visión intermedia 154 y visión de cerca 156, respectivamente, para una lente multifocal difractiva que tiene un perfil de fase generalizado en forma de dientes de sierra coherente tanto con la figura 3 como con la figura 5, en el que las alturas de escalón impares y las alturas de escalón pares pueden adoptar valores diferentes.

Una expresión para calcular eficiencias de difracción para el perfil de fase de la figura 5 se deriva generalizando un esquema divulgado en un artículo de Faklis y Morris (Dean Faklis y G. Michael Morris, "Spectral Properties of Multiorder Diffractive Lenses", Applied Optics, vol. 34, nº 14, 10 de mayo de 1995), secciones 1 y 2. Faklis y Morris presentan eficiencias de difracción relevantes para el perfil de fase de la figura 3 derivando una expresión para la eficiencia de difracción del orden difractado número m, η_m , expandiendo la función de transmisión de amplitud de la lente difractiva como una serie de Fourier, y extrayendo el coeficiente de Fourier, c_m . La eficiencia de difracción, η_m , viene dada por $|c_m|^2$. Para un perfil de fase que tiene alturas de escalón sustancialmente iguales, Faklis y Morris muestran que la eficiencia de difracción se puede expresar como

$$\eta_m = [\sin[\pi(\alpha p - m)]/\pi(\alpha p - m)]^2. \quad (4)$$

Al generalizar esta derivación, se puede demostrar que la eficiencia de difracción para el orden difractado número m para el perfil de fase de la figura 5, que tiene dos parámetros de dimensión (por ejemplo, alturas de escalón alternas) A1 y A2, viene dada por:

$$\eta_m(m, p, \alpha, A1, A2) = \sqrt[4]{\{ \text{sinc}[\pi/2(m-2A1p\alpha)]^2 + 2(-1)^m \cos[\pi(A1 - A2)p\alpha] \text{sinc}[\pi/2(m-2A1p\alpha)] \text{sinc}[\pi/2(m-2A2p\alpha)] + \text{sinc}[\pi/2(m-2A2p\alpha)]^2 \}}. \quad (5)$$

Se puede realizar una derivación similar para un diseño de lente que tiene tres o más alturas de escalón diferentes, produciendo una expresión diferente análoga a (5) para el ejemplo específico descrito en la presente memoria.

Con referencia a la figura 6, en los diagramas A, D y G se muestra un gráfico de η_m para m = 0; en los diagramas B, E y H se muestra un gráfico de η_m para m = +1; y en los diagramas C, F e I se muestra un gráfico de η_m para m = +2. En cada uno de los nueve diagramas, los ejes horizontales 158 representan alturas de escalón de picos de perfil pares, normalizados a 2π , y los ejes verticales 160 representan alturas de escalón de picos de perfil impares, normalizados a 2π . Por lo tanto, cada uno de los nueve diagramas proporciona un "mapa" topográfico en el que se pueden ubicar puntos de interés marcados con una "X", que corresponden a ejemplos de diferentes diseños de lentes difractivas, que se rigen por la elección de las alturas de escalón A1 y A2. Por lo tanto, los mapas indican, por su sombreado relativo en el punto de interés, la cantidad de energía dirigida a cada región focal para producir diferentes proporciones de visión de lejos, intermedia y de cerca. Por ejemplo, las alturas de escalón A1 y A2 se pueden elegir para mejorar las eficiencias de difracción para los tres focos por igual, o se pueden elegir para que la eficiencia de difracción de orden cero sea dos veces mayor que la del +primer y el +segundo órdenes, lo que produciría una mejor visión de lejos, a expensas de la visión intermedia. Las regiones sombreadas más claras en cada diagrama corresponden al 100% de eficiencia de difracción, y las regiones sombreadas más oscuras en cada diagrama corresponden al 0% de eficiencia de difracción. (Se puede generar un conjunto de diagramas similar para un diseño de lente que tenga tres o más alturas de escalón diferentes, A1, A2 y A3, de acuerdo con una expresión correspondiente derivada de forma

similar a la expresión (5) arriba mostrada.)

5 Los diagramas topográficos A, B y C en la figura 6 ilustran un caso límite en el que tanto las alturas 126 de escalón de fase par como las de fase impar, representadas por las variables A1 y A2, están a cero, es decir, este caso representa la ausencia de un patrón de superficie difractiva, que es esencialmente una lente refractiva. Al trazar el punto (0,0) en cada uno de los diagramas topográficos A, B y C se obtiene una "X" en la esquina inferior izquierda del campo topográfico. En el diagrama A, la X coincide con un punto brillante, lo que indica que aproximadamente el 100% de la luz está dirigido al "orden de difracción" cero (de lejos); en los diagramas B y C, la X coincide con una región oscura, lo que indica que prácticamente no hay nada de luz dirigida al primer y el segundo órdenes de difracción (intermedia y de cerca), lo que es coherente con la ausencia de un patrón de difracción multifocal en este ejemplo.

10 Los diagramas topográficos D, E y F en la figura 6 ilustran el caso límite correspondiente a una lente difractiva bifocal convencional, que tiene el perfil mostrado en la figura 3, en el que tanto las alturas 126 de escalón pares como las impares, representadas por las variables A1 y A2, son iguales a $0,5 * 2\pi$. Al trazar las coordenadas (0,5, 0,5) se obtiene una "X" cerca del centro de cada diagrama. En los diagramas D y F, la X coincide con una región gris, lo que indica que proporciones sustancialmente iguales de potencia de luz están dirigidas a los órdenes de difracción cero y segundo, correspondientes a la visión de lejos y la visión de cerca. En el diagrama E, la X coincide con una región oscura, lo que indica que sustancialmente el 0% de la potencia de la luz está dirigido al primer orden de difracción, correspondiente a la visión intermedia.

15

20 Los diagramas topográficos G, H e I en la figura 6 ilustran una realización preferida de una lente difractiva de múltiples escalones mostrada en la figura 5. En este ejemplo, las alturas 136 de escalón impares tienen asignado un valor $0,7 * 2\pi$ y las alturas 138 de escalón pares tienen asignado un valor $0,3 * 2\pi$, para obtener resultados óptimos. La razón para asignar estos valores se puede apreciar trazando el punto (0,3, 0,7) en cada uno de los diagramas topográficos G, H e I, lo que da como resultado una "X" en el cuadrante superior izquierdo de cada diagrama. En cada uno de los diagramas, la X coincide con una región sombreada en gris claro, indicando el valor en escala de grises que la potencia de la luz está dirigida por igual a cada uno de los órdenes de difracción cero, primero y segundo, de modo que la visión de lejos, intermedia y de cerca están todas ellas mejoradas sustancialmente por igual.

25

30 Un ejemplo de diseño más complejo, del que se muestra un perfil de fase gradualmente decreciente en la figura 7, proporciona una porción trifocal en el centro de la lente, que progresa a una lente bifocal en el borde de la lente. De acuerdo con esta realización, un par de alturas de escalón alternas disminuyen monótonamente desde los primeros valores prescritos 166 y 168 en el centro de la lente hasta los segundos valores prescritos 170 y 172 en el borde de la lente. Por ejemplo, los valores A1 y A2 de altura de escalón se pueden elegir para que sean $0,3\lambda$ y $0,7\lambda$ en el centro de la lente, y $0,1\lambda$ y $0,45\lambda$ en el borde de la lente, respectivamente. Una lente trifocal fabricada de acuerdo con dicho diseño proporcionaría una visión de lejos, intermedia y de cerca mejoradas para una persona con pupilas pequeñas, y favorecería la visión de lejos e intermedia para una persona con pupilas grandes, reduciendo gradualmente la visión de cerca para pupilas grandes. Visualmente, esto permitiría a una persona en condiciones de gran luminosidad conducir, ver un monitor de ordenador y leer, mientras que en condiciones de oscuridad, cuando no hay necesidad de leer, le permitiría conducir y ver un tablero de instrumentos con mayor claridad.

35

40 Aunque en la presente memoria se han ilustrado y descrito determinadas realizaciones, los expertos en la materia apreciarán que una amplia variedad de realizaciones o implementaciones alternativas o equivalentes calculadas para lograr los mismos objetivos pueden sustituir a las realizaciones ilustradas y descritas sin apartarse del alcance de la presente invención. Los expertos en la materia apreciarán fácilmente que las realizaciones de acuerdo con la presente invención se pueden implementar en una variedad de formas muy amplia. Esta aplicación está prevista para cubrir cualquier adaptación o variación de las realizaciones descritas en la presente memoria.

45 Los términos y expresiones que se han empleado en la especificación anterior se usan como términos descriptivos y no limitativos, el alcance de la invención está definido y limitado únicamente por las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Una lente multifocal difractiva que comprende un elemento óptico que tiene una primera superficie óptica (102) difractiva que tiene un perfil (130) de superficie radial que comprende una pluralidad de zonas anulares (104) concéntricas, que son concéntricas con una zona central y se pueden asignar, desde el borde exterior de la zona central hasta el borde de la lente, como zonas impares y pares alternas, cada una con un área de superficie proyectada igual, en donde el espesor óptico de la lente cambia monótonamente dentro de cada zona, se produce un escalón distinto en el espesor óptico en la unión entre las zonas (136, 138), la altura de los escalones difiere entre zonas adyacentes, y un patrón de diferencias de altura de escalón entre dos o más zonas adyacentes se repite periódicamente desde el centro hasta el borde de la lente para adaptar las proporciones de las eficiencias de orden de difracción de al menos un orden de difracción cero, un primer orden de difracción positivo y un segundo orden de difracción positivo del perfil (130) de superficie radial del elemento óptico.
2. La lente de la reivindicación 1, en la que las alturas (136, 138) de escalón de las zonas (104) pares son mayores que las alturas de escalón de las zonas (104) impares.
3. La lente de la reivindicación 2, en la que la diferencia en las alturas (136, 138) de escalón entre dos zonas (104) adyacentes cambia gradualmente desde el centro hasta el borde de la lente.
4. La lente de la reivindicación 1, en la que las alturas (136, 138) de escalón de las zonas (104) pares son menores que las alturas de escalón de zonas (104) impares, y preferiblemente en la que la diferencia en las alturas (136, 138) de escalón entre dos zonas (104) adyacentes cambia gradualmente desde el centro hasta el borde de la lente.
5. La lente de la reivindicación 1, en la que las alturas (136, 138) de escalón de al menos tres zonas (104) sucesivas en dirección radial difieren entre sí.
6. La lente de la reivindicación 5, en la que las tres o más alturas (136, 138) de escalón cambian gradualmente desde el centro hasta el borde de la lente.
7. La lente de la reivindicación 1, en la que las alturas (136, 138) de escalón se eligen de manera que las eficiencias de difracción de al menos el orden cero, el primer orden positivo y el segundo orden positivo sean sustancialmente iguales.
8. La lente de la reivindicación 1, en la que el área de superficie proyectada de cada zona (104) consecutiva es sustancialmente constante.
9. La lente de la reivindicación 1, en la que la altura del perfil de superficie radial de cada zona (104) forma un arco, o en la que la altura del perfil de superficie radial de cada zona (104) aumenta sustancialmente de forma lineal.
10. La lente de la reivindicación 1, que además comprende una segunda superficie óptica (134) que es una superficie óptica refractiva separada de la primera superficie óptica (130) difractiva.
11. La lente de la reivindicación 1, en la que la diferencia en las alturas (136, 138) de escalón entre dos zonas (104) adyacentes cambia gradualmente desde el centro hasta el borde de la lente.
12. La lente de la reivindicación 1, que está adaptada para ser utilizada como una lente de contacto, o que está adaptada para ser implantada quirúrgicamente como una lente intraocular.
13. Un método para producir una lente multifocal difractiva, que comprende:
 - modelar un elemento óptico que tiene un perfil (130) de superficie radial periódico que comprende una pluralidad de zonas anulares (104) concéntricas, teniendo cada una un área de superficie proyectada igual;
 - calcular a partir del modelo una distribución de eficiencia difractiva para la luz que se propaga a través del elemento óptico modelado;
 - seleccionar parámetros de dimensión de acuerdo con la distribución de eficiencia difractiva, para lograr las proporciones deseadas de las eficiencias difractivas para al menos un orden de difracción cero, un primer orden de difracción positivo y un segundo orden de difracción positivo del perfil de superficie radial único de la lente; y
 - formar en la superficie de un sustrato óptico el perfil de superficie periódico que incluye los parámetros de dimensión seleccionados, en donde los parámetros de dimensión se seleccionan para producir una pluralidad de diferentes alturas (136, 138) de escalón en el perfil (130) de superficie, en donde el espesor óptico de la lente cambia monótonamente dentro de cada zona (104), un escalón (136, 138) distinto en el espesor óptico tiene lugar en la unión entre las zonas (104), la altura de los escalones (136, 138) difiere entre zonas (104) adyacentes, y un patrón de diferencias (136, 138) de altura de escalón entre dos o más zonas (104) adyacentes se repite periódicamente desde el centro hasta el borde de la lente para adaptar las proporciones de las eficiencias de orden de difracción de al menos un orden cero, un primer orden positivo y un segundo orden positivo del perfil (130) de superficie radial único del elemento óptico.

- 5 14. El método de la reivindicación 13, en el que formar el patrón de perfil (130) de superficie comprende conformar una superficie del elemento óptico usando un torno, o comprende conformar una superficie del elemento óptico usando un molde, o comprende conformar una superficie del elemento óptico usando un haz de energía, o comprende conformar una superficie del elemento óptico mediante grabado, o comprende conformar una superficie del elemento óptico mediante eliminación de material de la superficie.
- 10 15. La lente de una cualquiera de las reivindicaciones 1-12 o el método de la reivindicación 13 o 14, en donde la altura de los escalones está determinada por la diferencia entre una altura inicial respectiva, que define un valor de fase cero o de referencia, y un valor de fase de pico respectivo, y en donde el patrón de diferencias de altura de escalón entre dos o más zonas adyacentes se repite periódicamente desde la zona central hasta el borde de la lente, con lo que resulta un perfil (122, 141) de fase en forma de dientes de sierra, en donde las alturas iniciales de los dientes de sierra de las dos o más zonas adyacentes tienen el mismo valor de fase cero o de referencia, desde la zona central hasta el borde de la lente.

Fig. 1
(TÉCNICA ANTERIOR)

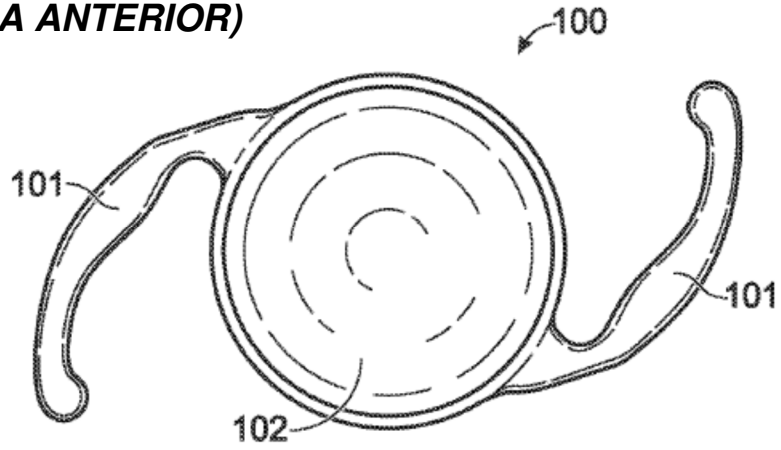


Fig. 2
(TÉCNICA ANTERIOR)

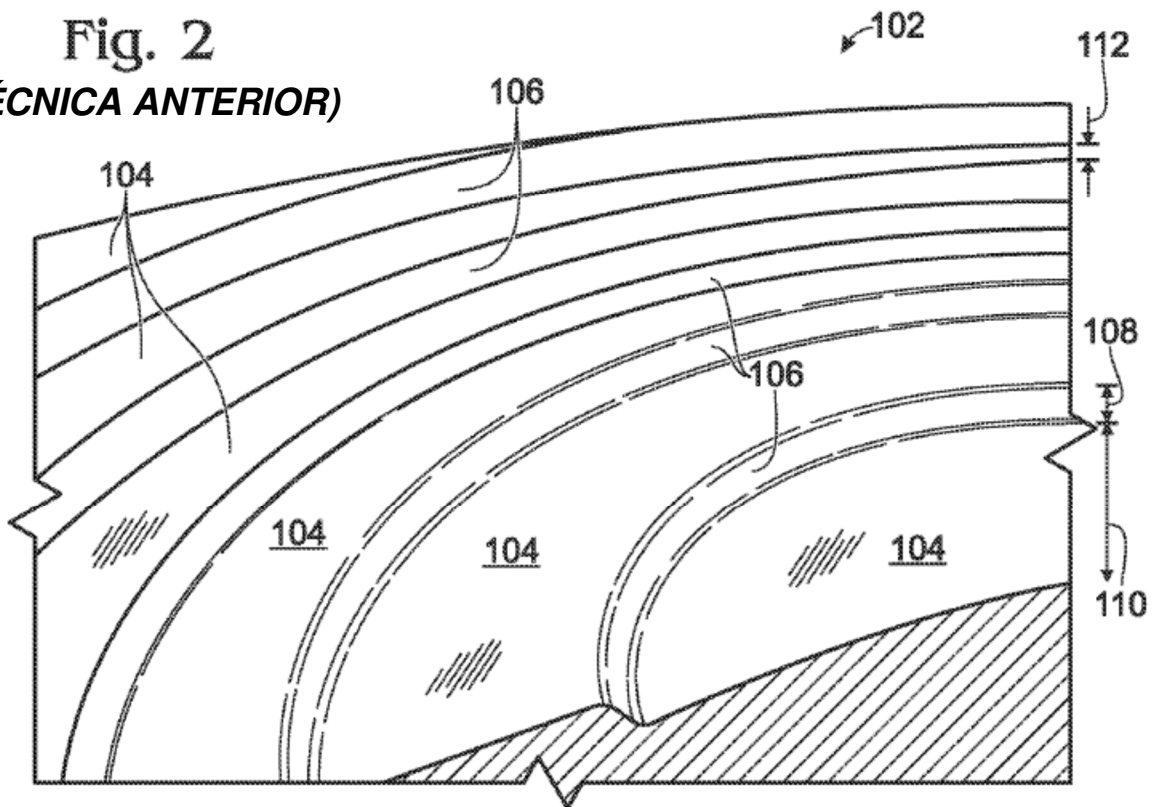


Fig. 3
(TÉCNICA ANTERIOR)

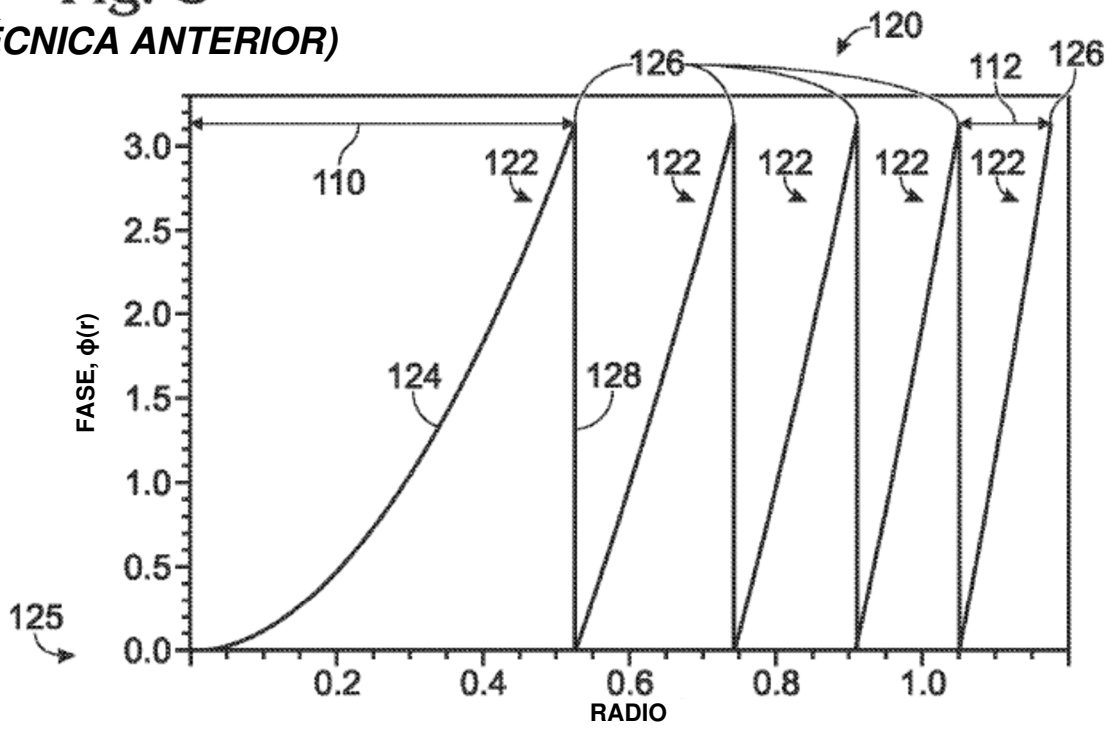


Fig. 4

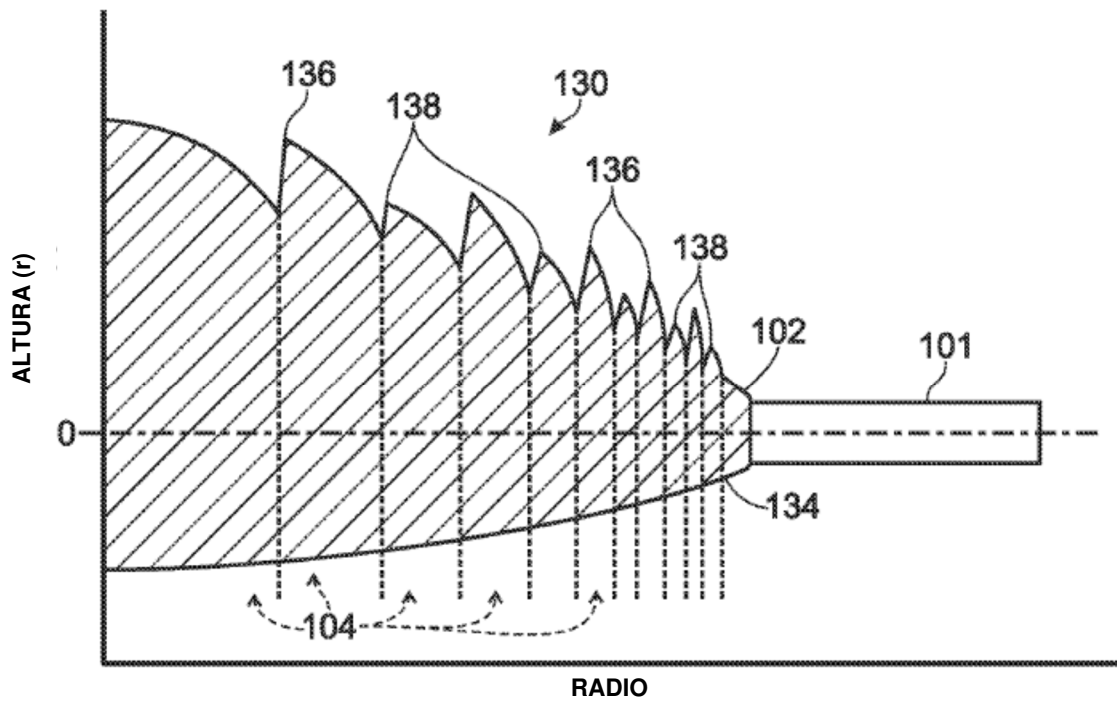


Fig. 5

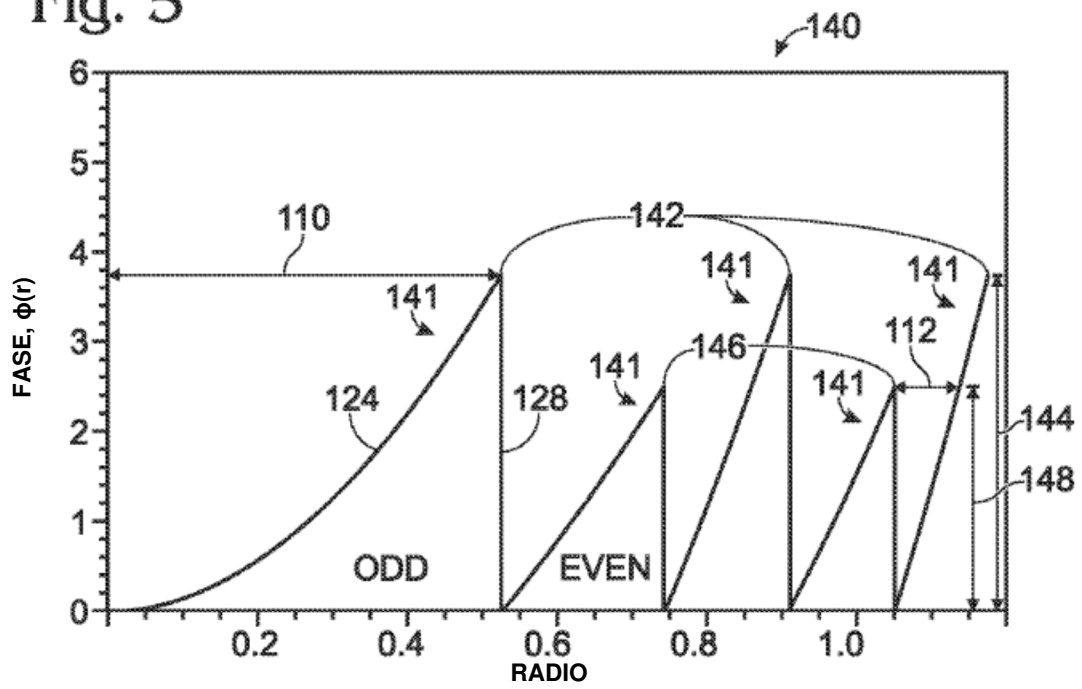


Fig. 7

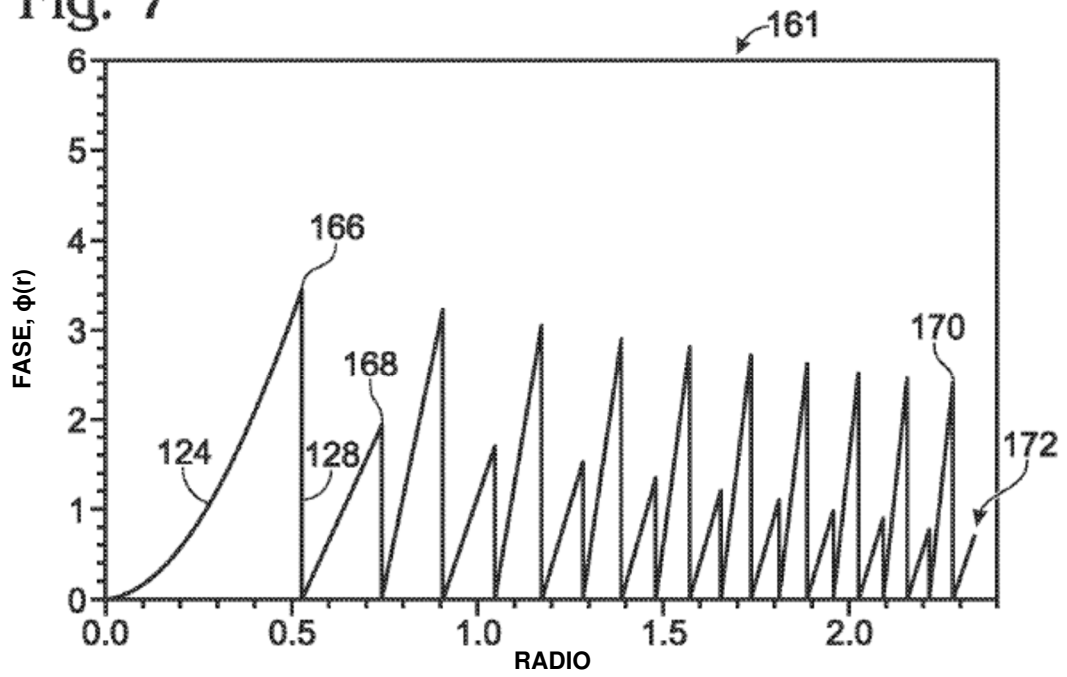


Fig. 6

