

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 895 799**

21 Número de solicitud: 202130631

51 Int. Cl.:

A61F 2/16 (2006.01)

G02B 3/10 (2006.01)

G02B 5/18 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

06.07.2021

43 Fecha de publicación de la solicitud:

22.02.2022

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

09.02.2023

Fecha de concesión:

04.12.2023

45 Fecha de publicación de la concesión:

13.12.2023

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
(75.0%)**

**Avda. de Seneca, 2
28040 Madrid (Madrid) ES y
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA (25.0%)**

72 Inventor/es:

**GOMEZ PEDRERO, Jose Antonio;
SANCHEZ BREA, Luis Miguel;
LORENTE VELAZQUEZ, Amalia;
MADRID COSTA, David;
DEL HOYO MUÑOZ, Jesus y
TORCAL MILLA, Francisco Jose**

54 Título: **Lente oftálmica refracto-difractiva con profundidad de foco extendida**

57 Resumen:

Lente oftálmica refracto-difractiva con profundidad de foco extendida.

Las lentes multifocales, tanto refractivas como difractivas, pueden considerarse lentes de foco extendido. Las lentes difractivas de foco extendido convencionales tienen simetría rotacional completa y un número discreto de focos. Pero presentan un problema ya que la calidad de imagen de dichas lentes disminuye en la zona entre focos.

La presente invención describe una lente oftálmica refracto-difractiva de foco extendido donde la fase difractiva presenta simetría discreta de revolución. El perfil difractivo se puede diseñar para distintas condiciones de enfoque y luminosidad gracias al alto número de grados de libertad que otorga la simetría rotacional discreta. Este perfil difractivo se puede aplicar tanto a lentes oftálmicas como a lentes de contacto, permite apodización y se puede combinar con superficies esféricas, tóricas o asféricas.



(a)



(b)



(c)

Fig.2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015. Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 895 799 B2

DESCRIPCIÓN

Lente oftálmica refracto-difractiva con profundidad de foco extendida

5 **SECTOR DE LA TÉCNICA**

La presente invención se encuadra en el sector de lentes oftálmicas y, más particularmente, se refiere a una lente oftálmica con profundidad de foco extendida de aplicación tanto en el diseño de lentes de contacto como de lentes intraoculares
10 fabricadas en diversos materiales.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

El cristalino es una lente natural situada en el interior del ojo humano que contribuye a
15 la formación de imagen por el ojo y que resulta clave en el mecanismo de acomodación por el cual el ojo es capaz de enfocar objetos situados a distintas distancias.

La capacidad de acomodación ocular se pierde con la edad de manera que, a partir de los 45 años, la mayoría de los individuos tienen dificultades para enfocar objetos
20 cercanos (lo que se conoce como presbicia). Pero el envejecimiento ocular no sólo conlleva una pérdida de acomodación sino que, en numerosos sujetos, el cristalino experimenta un proceso de opacificación (conocido como catarata) por el cual pierde transparencia y dispersa más la luz. Cuando la catarata se desarrolla completamente, la consecuencia es una pérdida total de visión. La catarata admite un tratamiento
25 quirúrgico que consiste en la extracción del cristalino natural y su sustitución por una lente artificial (denominada lente intraocular). Si la lente intraocular es rígida el ojo no puede acomodar y el sujeto pierde totalmente la capacidad de ver sin ayuda objetos próximos.

30 Hasta la fecha, se han desarrollado varios sistemas de compensación de la presbicia, como las lentes montadas en gafa (bien sea con una lente monofocal, bifocal o progresiva), las lentes de contacto que se llevan pegadas al ojo y las propias lentes intraoculares que también pueden ser utilizadas para la compensación de la presbicia.

Por ello, existe en el mercado una amplia gama de soluciones que van desde las lentes refractivas (que usan la refracción de la luz para la formación de imagen) a las lentes difractivas (basadas en el fenómeno de difracción de la luz).

- 5 Las lentes difractivas (o refracto-difractivas) utilizan el fenómeno de la difracción para formar una pluralidad de focos y enfocar a distintas distancias. La lente difractiva convencional (lente de Fresnel) es un elemento óptico refractivo por una cara y con una serie de anillos concéntricos de sección triangular convexa por la otra (Figura 1). Esta serie de anillos corresponden con las llamadas zonas de Fresnel para las cuales
- 10 la fase alcanza un valor $m q \pi$ siendo $m = 1, 2, 3, \dots$ y q un número racional que fija la magnitud del cambio de fase. Aunque, de manera natural, tiene una pluralidad de focos, el diseño clásico ($q = 2$) es un diseño bifocal con un foco de lejos y otro de cerca, de modo que hay un rango de distancias intermedias en las que no es posible enfocar con nitidez.
- 15 Existen en el mercado lentes intraoculares bifocales como Tecnis® ZMB00 (Abbott Medical Optics, Santa Ana, CA, EE. UU. o la AcrySof® IQ ReSTOR SN6AD3 (Alcon Laboratories Inc., Fort Worth, TX, EEUU).
- 20 En los últimos años se han propuesto algunas soluciones a este problema de enfocar a distancias intermedias. Así, la patente EP2503962 describe un diseño con dos perfiles difractivos superpuestos (aunque también se pueden grabar por separado en cada una de las superficies de la lente); la longitud focal del primer perfil es la mitad de la longitud focal del segundo perfil, de modo que la lente presenta tres focos (lejos,
- 25 intermedio y cerca). En la patente US 9,335,564 se propone una lente difractiva con una variación en el salto de imagen de cada una de las zonas de Fresnel; al igual que en el caso anterior, el resultado es la aparición de tres focos. Finalmente, la patente US 10,197,815 describe una lente bizonal difractiva, con dos zonas anulares que presentan distinto valor de q , de forma que se combinan los modos internos 0 y 1 de
- 30 la zona anular interna con los modos 1 y 2 de la zona anular externa, dando lugar a una lente trifocal.

En el mercado, también existen lentes trifocales como la FineVision® (PhysIOL SA,

Lieja, Bélgica) o la AT LISA®tri 839MP (Carl Zeiss Meditec AG, Jena, Alemania).

Tanto en el caso de las lentes de contacto como de las lentes intraoculares, una alternativa para conseguir la compensación para múltiples distancias objeto es mediante las llamadas "lentes de profundidad de foco extendido". Para un sistema óptico cualquiera, la profundidad de foco es un intervalo de puntos situados en las cercanías del punto imagen al cual está enfocado el sistema, de modo que el sistema forma una imagen en cualquier punto del intervalo con una calidad óptica similar a la del punto imagen. Debido a la conjugación objeto-imagen, cuanto mayor profundidad de foco tenga un sistema, mayor rango de distancias objeto podrá enfocar (este rango de distancias objeto se denomina en la literatura "profundidad de campo").

Un modo de aumentar la profundidad de foco de una lente oftálmica es mediante el uso de una máscara que restrinja el diámetro máximo del haz de luz incidente al ojo. Así, en el documento US 9,545,303 se describe el uso de máscaras con absorción selectiva de radiación que permiten una zona anular central con paso de luz visible y una zona periférica donde sólo pasa radiación con longitud de onda del infrarrojo cercano. El inconveniente que presenta esta solución (y similares) es que limita la cantidad de luz que llega al ojo, lo cual puede ser problemático en condiciones de baja iluminación. Otra solución para aumentar la profundidad de foco es el uso de lentes fabricadas con superficies esféricas que presentan aberración esférica negativa. Por ejemplo, en el documento US 8,535,376 se presenta una familia de diseños con esta propiedad. Teóricamente, una lente con aberración esférica negativa permitiría visión a larga distancia cuando el ojo tiene la pupila dilatada y a corta distancia cuando el ojo tiene la pupila contraída, aunque con un rango de enfoque limitado.

Las lentes multifocales, tanto refractivas como difractivas, también pueden considerarse lentes de foco extendido aunque, en este caso, el principio de funcionamiento se basa en que la lente presenta, simultáneamente, varias distancias focales que permiten formar imágenes de objetos lejanos y cercanos. Los diseños refractivos presentan dos zonas de distinta potencia (en muchos casos son zonas anulares) de modo que, dependiendo del tamaño de la pupila del ojo, el sujeto enfoca por una o dos zonas existiendo, en general, una imagen nítida según la distancia de

enfoque y otra borrosa superpuesta. El problema con esta solución es la pérdida de contraste y luminosidad de la imagen (Alonso, J. et al. *Modern Ophtalmic Optics, 1st edition*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, **2019**).

- 5 En el mercado, una de estas lentes de foco extendido es la Tecnis® Symphony (Abbott Medical Optics, Santa Ana, CA, EE. UU.) que se caracteriza por el diseño *echelette* y el tratamiento de la aberración cromática. El diseño difractivo *echelette* aporta un patrón de difracción de la luz que alarga el foco en el ojo, dando lugar a un rango de visión extendido.

10

Las lentes difractivas descritas anteriormente tienen simetría rotacional completa y un número discreto de focos. Pero presentan un problema, ya que la calidad de imagen de dichas lentes disminuye en la zona entre focos. Por ello, es deseable una lente con mayor extensión de la profundidad de campo minimizando la pérdida de contraste y

- 15 que permita un amplio rango de distancias en las que la lente forma una imagen nítida del objeto.

- En trabajos anteriores se ha estudiado el efecto sobre la profundidad de foco de lentes con simetría rotacional discreta. Así, se han examinado las propiedades difractivas de
- 20 lentes análogas a las lentes convencionales de Fresnel (que presentan anillos concéntricos y, por tanto, simetría rotacional completa) pero que poseen anillos en forma de pétalos de flor en lugar de anillos de bordes lisos (Sabatyan, A. y Golbandi, M. “Petal-like zone plate: long depth bifocal diffractive lens and star-like beam generator”, *Journal of the Optical Society of America A*, 35(7), **2018**). En su trabajo,
 - 25 Sabatyan y Golbandi estudian cómo influye el número y la forma de los pétalos (pétalos tipo margarita o tipo flor de loto) y el espacio entre anillos sobre la profundidad del foco. El diseño planteado es válido para algunas aplicaciones, como antenas, pero no puede aplicarse en otros casos como, por ejemplo, en lentes intraoculares ya que suponen una pérdida excesiva de contraste y de luz y, además, sería difícil con las actuales
 - 30 técnicas de fabricación trasladar el perfil de fase propuesto en una elevación que sea fabricable. En un trabajo posterior (Sánchez-Brea, L.M. et al. “Optimization of angular diffractive lenses with extended depth focus”, *Journal of Optics*, 22, **2020**), algunos inventores de la presente invención, plantearon la optimización de lentes de foco

extendido tipo *Daisy* (anillos con bordes en forma de pétalos de margarita) y tipo *Lotus* (anillos con bordes en forma de pétalos de flor de loto), con variación angular de la distancia focal, de aplicación a lentes oftálmicas y analizaron el resultado comparándolo con una lente convencional de Fresnel; para ello, desarrollaron un

5 modelo analítico basado en la suma ponderada incoherente de lentes difractivas estándar y validaron el comportamiento de este tipo de lente para su aplicación potencial como lente oftálmica de contacto, lente intraocular, generadores láser de enfoque u otras aplicaciones donde es conveniente un foco extendido.

- 10 En la presente invención se plantea el diseño de una lente oftálmica que dispone de una zona difractiva formada por anillos concéntricos de forma ondulada. El diseño permite optimizar la forma y número de las ondas de los anillos para conseguir una extensión de la profundidad de campo y una mínima pérdida de contraste que permite un amplio rango de distancias en las que la lente forma una imagen nítida del objeto.

15

EXPLICACIÓN DE LA INVENCION

La presente invención describe una lente refracto-difractiva de foco extendido donde la fase difractiva presenta simetría discreta de revolución para resolver los problemas

20 planteados por las lentes difractivas con simetría de revolución total. De forma más concreta, se presenta una modificación del patrón difractivo de modo que dicho patrón presenta una simetría discreta de revolución.

- 25 En las lentes difractivas convencionales, la superficie difractiva o kinoforma está formada por una serie de anillos concéntricos circulares donde la elevación de la superficie experimenta un salto (Fig. 1). Estas variaciones bruscas de perfil de la superficie permiten la formación de focos múltiples, de acuerdo con la teoría de la difracción. Una lente fabricada con dichos perfiles convencionales presenta una pluralidad de focos, pudiendo enfocar a una serie de distancias objeto discretas.

30

En la presente invención, sin embargo, se propone una superficie difractiva que también tiene saltos de altura, pero, en lugar de tener anillos concéntricos circulares, tiene anillos de perfil ondulado de forma que las zonas donde se produce el salto de

altura tienen forma ondulada. De este modo, se rompe la simetría completa de revolución y es posible, en determinadas circunstancias, ampliar el rango de distancias en las que la lente forma una imagen nítida del objeto. Una lente con este comportamiento es denominada en la literatura lente de foco extendido.

5

La invención también se refiere a una metodología para determinar la forma del perfil ondulado que se traduce en una profundidad de foco extendido.

En este caso, la fase difractiva se describe mediante una función expresada, en coordenadas polares como, $\varphi_d(r, \theta)$ que presenta un período angular $p = \frac{2\pi}{M}$ $M \in \mathbb{N}$, de modo que $\varphi_d(r, \theta + p) = \varphi_d(r, \theta) \quad \forall(r, \theta)$. La fase difractiva puede representarse mediante la función general:

10

$$\varphi_d(r, \theta) = \frac{\pi r^2}{\lambda_0(f_0 + \Delta f \sum_{n=1}^N a_n \cos(nM\theta))}$$

15 donde λ_0 es la longitud de onda de diseño, f_0 la focal principal, Δf el parámetro que controla la profundidad de foco y $\{a_n\}_{n=1, \dots, N}$ los coeficientes de la serie de Fourier que define la función de fase $\varphi_d(r, \theta)$.

Además de la fase difractiva, la lente presenta una fase refractiva dada por:

20

$$\varphi_r(r) = \frac{\pi r^2}{\lambda_0 f_r}$$

siendo f_r la longitud focal correspondiente a la fase refractiva.

Por tanto, el cambio total de fase que introduce la lente es:

25

$$\varphi(r, \theta) = \varphi_r(r) + \varphi_d(r, \theta)$$

30

Este cambio de fase se puede conseguir de varias maneras en las distintas realizaciones de la invención. Por ejemplo, en una realización, la fase refractiva puede venir dada en una primera superficie de la lente y la fase difractiva en una segunda superficie; o se puede tener una superficie refractiva sobre la que se graba el perfil difractivo que da lugar a la fase difractiva, con lo que se tiene una superficie refractiva-difractiva a la vez. En el caso más general, la lente está formada por dos superficies

con un perfil de difracción grabado en ellas, es decir, se trata de una lente con dos superficies difractivo-refractivas.

Una de las superficies o ambas superficies pueden ser esféricas. En otra realización
5 de la invención, la superficie refractiva puede ser tórica o asfero-tórica.

Para generar una fase difractiva es necesario grabar un perfil difractivo en, al menos, una de las superficies de la lente (5). Dicho perfil difractivo (5) viene dado por la
10 siguiente función elevación:

$$z(r, \theta) = \frac{\lambda_0}{2\pi\Delta n} (\varphi_d(r, \theta) - q\pi \bmod(\varphi_d(r, \theta), q\pi)) \quad q \in Q$$

Donde *mod* es la función parte entera y $\Delta n = n_1 - n_2$ es la diferencia entre los índices de refracción de los medios anterior (n_1) y posterior (n_2) de la superficie donde se
15 graba el perfil difractivo. El valor de q puede ajustarse para modificar el reparto de energía dentro del haz difractado.

La lente diseñada puede ser también apodizada. Para ello, se puede multiplicar la elevación $z(r, \theta)$ por la función de apodización estándar $z(\rho) = 1 - \rho^{2n+1}$, $n \in N$,
20 donde ρ es la coordenada radial normalizada a la apertura de la lente.

Para conseguir las propiedades de foco extendido deseadas, es necesario llevar a cabo un proceso de diseño y optimización. Este proceso puede realizarse mediante un programa de diseño óptico, siendo resultado un conjunto de coeficientes $\{a_n\}_{n=1, \dots, N}$
25 que define una distribución concreta de fase difractiva.

En el caso concreto de la presente invención, este proceso de optimización requiere de un modelo de ojo para comprobar que la lente proporciona, de manera efectiva, una profundidad de foco extendida que se traduce en un rango de visión nítida
30 aceptable, tanto en el caso de una lente de contacto como en el caso de una lente oftálmica. Para definir la profundidad de foco, se parte de la función:

$$f(\theta) = f_0 + \Delta f \sum_{n=1}^N a_n \cos(nM\theta)$$

Que permite definir la distancia focal promedio de la lente difractiva como:

$$\underline{f} = \langle f \rangle = \frac{M}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{M}} f(\theta) d\theta$$

5 de modo que la profundidad de foco se puede determinar del siguiente modo:

$$\delta f^2 = \langle f^2 \rangle - \underline{f}^2 = \Delta f^2 \sum_{n=1}^N a_n^2$$

Según Sánchez-Brea et al. ("Optimization of angular diffractive lenses with extended depth focus", *Journal of Optics*, 22, **2020**), la distribución de intensidad en un plano
10 cercano al plano focal de una lente de simetría discreta puede considerarse como una superposición incoherente de la intensidad de lentes convencionales de distinta focal, de manera que:

$$I(r, \theta) = \int_f p(f) I_f(r, \theta) df$$

15

donde $I_f(r, \theta)$ es la distribución de intensidad de una lente convencional y $p(f)$ es una función de peso que es igual al histograma de la función $f(\theta)$ que describe la variación angular de la distancia focal. Dicho histograma puede calcularse como:

20

$$p(f) = \left| \frac{df^{-1}(\xi)}{d\xi} \right|$$

donde $f^{-1}(\xi)$ es la inversa de la función $f(\theta)$. Aplicando las reglas de derivación:

$$p(f) = \frac{1}{\left| \frac{df}{d\theta} \right|}$$

25

Sustituyendo la función $f(\theta)$ general se obtendría:

$$p(f) = \begin{cases} \frac{1}{M \Delta f |\sum_{n=1}^N n a_n \sin(nM\theta)|} & \text{si } 0 < \theta < \frac{\pi}{M} \\ 0 & \text{si } \theta \leq 0 \text{ ó } \theta \geq \frac{\pi}{M} \end{cases}$$

El valor mínimo de $p(f)$ se alcanza para $\theta = \frac{\pi}{2M}$ y es igual a:

$$\min(p(f)) = \frac{1}{M\Delta f |\sum_n^N n a_n (-1)^{n+1}|}$$

- 5 Dado que cuanto menor sea el mínimo de $p(f)$ menor es la cintura del haz. Para conseguir minimizar la cintura de haz es necesario maximizar M y/o la suma $|\sum_n^N n a_n (-1)^{n+1}|$.

10 Por todo lo anterior, las condiciones generales para el diseño de lentes de foco extendido basadas en superficies difractivas con simetría rotacional discreta son:

1. Aumentar el valor de la suma $\sum_{n=1}^N a_n^2$ para conseguir la mayor profundidad de foco posible.
2. Aumentar el valor de la suma $|\sum_n^N n a_n (-1)^{n+1}|$ para conseguir la menor cintura de haz posible.
- 15 3. Diseñar la lente con el mayor número de pétalos (M) posible que se pueda fabricar.
4. Modificar el parámetro Δf que controla la profundidad de foco para conseguir la mayor profundidad de foco extendido posible sin que la extensión de dicho perfil ocupe la totalidad de la apertura de la lente.

20

Por tanto, las lentes fabricadas con esta superficie muestran una simetría de revolución discreta que da lugar a una profundidad de foco extendida que depende de los parámetros Δf , $\{a_n\}_{n=1,\dots,N}$ y M . El parámetro Δf , que controla la profundidad de foco, se puede variar dentro de un intervalo, aumentando hasta un punto en que empieza a empeorar la calidad de la imagen. Los coeficientes $\{a_n\}_{n=1,\dots,N}$, que definen una

25 distribución concreta de fase difractiva, corresponden a una determinada forma de las ondas de los anillos concéntricos de esta fase, por ejemplo, ondas en forma de pétalos tipo margarita (*daisy lens*) o forma de pétalos tipo flor de loto (*lotus lens*) descritas en literatura (Sabatyan, A. y Golbandi, M. "Petal-like zone plate: long depth bifocal

30 diffractive lens and star-like beam generator", *Journal of the Optical Society of America A*, 35(7), **2018**). El parámetro M corresponde al número de ondas de los anillos concéntricos, preferentemente un número par y potencia de 2, que hace posible que

la lente tenga simetría de revolución discreta. Para un número M pequeño (hasta 16), la estructura del haz difractado en el foco presenta también una estructura de simetría de revolución discreta y, por otro lado, para valores altos de M (mayor de 64) la lente quizás sería difícil de fabricar con los medios actuales.

5

Esta metodología de diseño presenta una serie de ventajas respecto a los diseños actuales. En primer lugar, se dispone de un parámetro Δf que está relacionado directamente con la profundidad de foco y permite establecer, a priori, la profundidad de foco deseada. Por otro lado, el uso de la descripción en serie de Fourier proporciona

10 un gran número de grados de libertad (idealmente infinitos) con lo cual se pueden conseguir una multiplicidad de soluciones. Además, se pueden proporcionar las condiciones de contorno que deben satisfacer los coeficientes de Fourier, $\{a_n\}_{n=1,\dots,N}$ para encontrar soluciones que presenten, simultáneamente, una profundidad de foco extendida considerable con una menor cintura de haz en el foco (lo que se traduce en

15 una mayor resolución de la lente). Por último, la mayor ventaja del diseño propuesto es que la lente no tiene un conjunto discreto de focos, sino que presenta una zona continua donde se concentra la energía, lo cual significa que la energía dispersada hacia zonas fuera de foco es menor y, por tanto, es esperable que las lentes tengan menores efectos adversos como pérdida de contraste o aparición de halos en el borde

20 del campo.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una

25 mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Fig.1: muestra una vista frontal y de perfil de una lente intraocular difractiva donde se

30 distingue un contorno frontal de la lente (1), hápticos para la sujeción de la lente a las estructuras internas del ojo (2), anillos difractivos (3), vista de perfil de la superficie refractiva continua (4) y vista de perfil de la superficie difractiva donde se aprecian las discontinuidades (5) que se corresponden con los anillos difractivos de la vista frontal.

Fig.2: muestra un esquema de (a) lente tipo Fresnel (anillos lisos), (b) lente tipo *Daisy* (anillos con pétalos tipo margarita) y (c) lente tipo *Lotus* (anillos con pétalos tipo flor de loto).

5

Fig.3: muestra una sección del modelo de ojo de Navarro donde se representa la superficie anterior de la córnea (6), la superficie posterior de la córnea (7), el diafragma o iris (8), la cámara anterior (9), la superficie anterior del cristalino (10), la superficie posterior del cristalino (11), la cámara posterior o cámara vítrea (12), la retina (13) y la fovea (14).

10

Fig.4: representa la función de transferencia de modulación (MTF) policromática frente a la frecuencia espacial para un modelo de ojo de Navarro en el que el cristalino se ha sustituido por una lente intraocular con un perfil difractivo en cara anterior, comparando tres diseños (el diseño clásico de Fresnel frente a las lentes tipo *Lotus* y *Daisy* con simetría rotacional discreta que propone la presente invención) y la MTF de una sistema óptico perfecto. (a) objeto infinito y diámetro pupilar 4.25 mm, (b) distancia objeto $s = -1000$ mm y diámetro pupilar de 3.5 mm, (c) distancia objeto $s = -571$ mm y diámetro pupilar 3.3 mm y (d) distancia objeto $s = -444.44$ mm y diámetro pupilar 3 mm.

20

Fig.5: representación de la función de transferencia de modulación (MTF) para la frecuencia espacial de 10 ciclos por grado en función de la vergencia objeto, para los tres diseños estudiados (lente convencional de Fresnel y lentes *Daisy* y *Lotus*).

25

Fig.6: vista frontal de las superficies difractivas de las realizaciones propuestas: (a) *Daisy* y (b) *Lotus*, donde las líneas de contorno se corresponden con las zonas de la superficie en las que la fase difractiva alcanza los valores $\phi_d = 2m\pi$, $m \in N$.

30

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

La presente invención se ilustra mediante los siguientes ejemplos, los cuales no

pretenden ser limitativos de su alcance.

Ejemplo 1.

Este ejemplo se refiere a la determinación de la profundidad de foco para el caso de lentes de foco extendido con simetría rotacional discreta del tipo *Daisy* y del tipo *Lotus* (Fig. 3).

Para la lente *Daisy* se cumple que $a_1 = 1, a_j = 0 \forall j > 1$, de modo que la fase difractiva (5) de la lente resulta ser:

$$\varphi_d(r, \theta) = \frac{\pi r^2}{\lambda_0(f_0 + \Delta f \cos(M\theta))}$$

Para la lente *Lotus* los coeficientes de la serie de Fourier viene dados por $a_n = \frac{8}{\pi^2 n^2}$ $n = 1, 3, 5, \dots$, y la fase difractiva (5) resulta ser:

$$\varphi_d(r, \theta) = \frac{\pi r^2}{\lambda_0 \left(f_0 + \Delta f \left(4 \left| \frac{M\theta}{2\pi} - \left[\frac{M\theta}{2\pi} + \frac{1}{2} \right] \right| - 1 \right) \right)}$$

donde $||$ es el operador valor absoluto y $[\]$ es el operador parte entera pero redondeado hacia abajo (*floor*).

De acuerdo con el procedimiento general, para la lente *Daisy* la profundidad de foco viene dada por:

$$\delta f = \Delta f$$

Y para la lente *Lotus* la profundidad de foco sería:

$$\delta f^2 = \Delta f^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{64}{n^2(2n+1)^4} = 0.64 \Delta f^2$$

Por otro lado, el cálculo del mínimo de la función $p(f)$ para la lente *Daisy* resulta

$\min(p(f)) = \frac{1}{M\Delta f}$ mientras que para la lente *Lotus*

$$\min(p(f)) = \frac{8}{\pi^2 M\Delta f} \left(1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \dots \frac{1}{N}\right)$$

Ejemplo 2.

- 5 Este ejemplo se refiere al diseño de lentes intraoculares para el caso de lentes de foco extendido con simetría rotacional discreta del tipo *Daisy* y del tipo *Lotus* (Fig. 3).

Se diseñan lentes intraoculares partiendo del modelo del ojo de Navarro (Escudero-Sanz et al. "Off-axis aberrations of a wide-eye schematic eye model", *J. Opt. Soc. Am. A.*, 16, **1999**). Este modelo (Fig.3) consiste en córnea formada por la superficie anterior (6) y posterior (7), un diafragma o iris (8), un cristalino también con superficie anterior (10) y posterior (11) separado de la córnea por la cámara anterior (9) y de la retina (13) por la cámara vítrea (12). Para que el ojo pueda observar un objeto cualquiera se debe formar una imagen nítida del mismo en la fovea (14).

15

En este caso, la superficie difractiva se graba sobre la superficie anterior, que es una superficie esférica conicoide con simetría de revolución. El coeficiente de asfericidad de dicha superficie es -0.5. Para el diseño se han seleccionado cuatro configuraciones, según se muestra en la Tabla 1 donde puede apreciarse la variación de la pupila con relación a la distancia objeto. Los datos de la Tabla 1 indican que la adición de este diseño es de 2.25 D (correspondiente a una distancia objeto $s = -444.44 \text{ mm}$) aunque se podrían considerar igualmente otros valores de adición, distancias y/o tamaños pupilares.

20

Tabla 1

Configuración	1	2	3	4
$s \text{ (mm)}$	∞	-1000.00	-571.00	-444.44
$D_{pupila} \text{ (mm)}$	4.25	3.50	3.33	3.00

25

Ejemplo 3.

Este ejemplo se refiere la optimización de lentes intraoculares para el caso de lentes de foco extendido con simetría rotacional discreta del tipo *Daisy* y del tipo *Lotus*.

Además de optimizar los diseños de las lentes *Daisy* y *Lotus* del ejemplo 2, se optimiza una lente difractiva convencional de Fresnel. En el proceso de optimización se determinan los valores óptimos que definen la lente difractiva: distancia focal principal, f_0 , profundidad de foco, Δf , y número de pétalos, M , tanto en el caso del diseño *Daisy* como del diseño *Lotus*. También se determinan los radios de curvatura de las superficies refractoras de la lente (la lente difractiva se graba sobre la superficie refractora anterior). No es necesario optimizar a la vez las superficies refractoras y difractivas, ya que es posible realizar la optimización por separado.

10

En este caso, se ha tomado como diámetro de la lente 6 mm porque es el valor más común. La distancia focal se ha fijado en cada caso y se ha tomado un Δf correspondiente, aproximadamente, al 5% de la focal principal.

En la Tabla 2 se muestran los parámetros de las lentes difractivas propuestas en la invención (*Daisy* y *Lotus*) y la lente convencional de Fresnel. Estas lentes pueden considerarse como lentes de adición, cuya potencia es 2.35 D para la lente *Daisy*. 2.75 D para la lente *Lotus* y 3.25 para la lente de Fresnel.

Tabla 2

Lente	f' (mm)	Δf (mm)	M	D (mm)
<i>Daisy</i>	424.00	-20	64	6
<i>Lotus</i>	362.35	-20	64	6
Fresnel	309.03	-	-	6

20

Tanto para la lente *Daisy* como para la lente *Lotus*, los diseños seleccionados contienen un número de pétalos elevado, ($M = 64$), para garantizar una menor cintura de haz de acuerdo con las condiciones de diseño expuestas anteriormente.

25 Ejemplo 4.

En este ejemplo se realiza una comparación del resultado obtenido con las lentes diseñadas y la lente de Fresnel.

En la Fig.4 se muestran los valores de MTF policromática para las tres lentes y cuatro distancias objeto. Como puede verse, la lente *Daisy* presenta una mayor calidad de imagen en todas las distancias, salvo para la distancia más cercana al enfoque. La lente *Lotus* tiene un comportamiento más parecido a la lente de Fresnel convencional, aunque con mejor calidad de imagen en visión lejana.

En la Fig.5 se muestra la MTF policromática *through focus* para una frecuencia espacial de 10 ciclos/° de los tres diseños. Como puede verse, la lente *Daisy* es la que mayor profundidad de foco presenta, seguida de la lente *Lotus*, lo cual es coherente con el resultado general, ya que la profundidad de campo de la lente *Lotus* es $\delta f^2 = 0.64\Delta f^2$ mientras que para la realización de la lente *Daisy* $\delta f = \Delta f$. En conclusión, las dos realizaciones muestran una mayor profundidad de foco que la lente convencional difractiva.

Por último, la Fig.6 muestra los contornos para los cuales la fase difractiva es $\varphi_d = 2m\pi$ $m = 1,2,3, \dots$ tanto para la realización de la lente *Daisy* (figura 6a) como la de la lente *Lotus* (figura 6b). Estos contornos muestran que la producción industrial de estas lentes sería factible, así como la pérdida de simetría rotacional que tienen estas lentes en comparación con la lente convencional mostrada en la Fig.1.

REIVINDICACIONES

1. Lente de foco extendido que comprende una superficie anterior y una superficie posterior en la que, al menos, una de dichas superficies incluye un perfil difractivo, caracterizado porque:
- 5
- la función de fase difractiva $\varphi_d(r, \theta)$ viene dada por la función con simetría rotacional discreta expresada en coordenadas polares por la ecuación:
- $$\varphi_d(r, \theta) = \frac{\pi r^2}{\lambda_0 f(\theta)} = \frac{\pi r^2}{\lambda_0 (f_0 + \Delta f \sum_{n=1}^N a_n \cos(nM\theta))}$$
- 10
- donde λ_0 es la longitud de onda de diseño, $f(\theta)$ es la función que describe la variación angular de la distancia focal, f_0 la focal principal, Δf el parámetro que controla la profundidad de foco, M es el número de períodos en el rango 2π (número de pétalos) y $\{a_n\}_{n=1, \dots, N}$ los coeficientes de la serie de Fourier que define la función de fase $\varphi_d(r, \theta)$,
- 15
- la profundidad de foco viene dada por la ecuación:
- $$\delta f^2 = \Delta f^2 \sum_{n=1}^N a_n^2$$
- los valores de Δf , $\{a_n\}_{n=1, \dots, N}$ y M hacen mínima la función de peso $p(f)$ que es igual al histograma de la función, $f(\theta)$
- 20
- $$\min(p(f)) = \frac{1}{M \Delta f |\sum_{n=1}^N n a_n (-1)^{n+1}|}$$
2. Lente, según reivindicación 1, donde Δf que controla la profundidad de foco aumenta hasta un punto en que empieza a empeorar la calidad de la imagen por falta de nitidez.
- 25
3. Lente, según reivindicación 2, donde Δf es aproximadamente un 5% del valor de la focal principal.
- 30
4. Lente, según reivindicación 1, donde M es un número par.

5. Lente, según reivindicación 4, donde M es un número potencia de 2.
6. Lente, según reivindicación 5, donde M está comprendido entre 16 y 64.
- 5 7. Lente, según reivindicación 1, donde $a_1 = 1, a_j = 0 \forall j > 1$
8. Lente, según reivindicación 1, donde $a_n = \frac{8}{\pi^2 n^2} \quad n = 1, 3, 5, \dots$
9. Lente, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que dicha lente
10 es una lente oftálmica que presenta también una fase refractiva.
10. Lente, según reivindicación 9, en la que dicha lente es una lente de contacto que
presenta también una fase refractiva.
- 15 11. Lente, según reivindicación 9, en la que dicha lente es una lente intraocular que
presenta también una fase refractiva.
12. Lente, según reivindicación 9, donde una de las superficies o ambas superficies
pueden ser esféricas
- 20 13. Lente, según reivindicación 9, la superficie refractiva puede ser tórica o asfero-
tórica
14. Lente, según cualquiera de las reivindicaciones 10 y 11, donde la fase refractiva
viene dada en una primera superficie de la lente y la fase difractiva en una
25 segunda superficie.
15. Lente, según cualquiera de las reivindicaciones 10 y 11, las dos superficies son
refractivas y sobre ellas se graba el perfil difractivo dando lugar a dos superficies
30 difracto-refractivas.
16. Lente, según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 15, donde la lente diseñada
es apodizada.
- 35 17. Lente, según reivindicación 16, donde la apodización se realiza multiplicando
una función de apodización estándar como $z(\rho) = 1 - \rho^{2n+1}$, $n \in N$, donde ρ es

la coordenada radial normalizada a la apertura de la lente, a la ecuación general de elevación de la superficie difractiva.

18. Método de diseño y optimización de lente de foco extendido que comprende una superficie anterior y una superficie posterior en la que, al menos, una de dichas superficies incluye un perfil difractivo, caracterizado porque:

- la función de fase difractiva $\varphi_d(r, \theta)$ viene dada por la función con simetría rotacional discreta expresada en coordenadas polares por la ecuación:

$$\varphi_d(r, \theta) = \frac{\pi r^2}{\lambda_0 f(\theta)} = \frac{\pi r^2}{\lambda_0 (f_0 + \Delta f \sum_{n=1}^N a_n \cos(nM\theta))}$$

donde λ_0 es la longitud de onda de diseño, $f(\theta)$ es la función que describe la variación angular de la distancia focal, f_0 la focal principal, Δf el parámetro que controla la profundidad de foco, M es el número de períodos en el rango 2π (número de pétalos) y $\{a_n\}_{n=1, \dots, N}$ los coeficientes de la serie de Fourier que define la función de fase $\varphi_d(r, \theta)$,

- la profundidad de foco viene dada por la ecuación:

$$\delta f^2 = \Delta f^2 \sum_{n=1}^N a_n^2$$

- se seleccionan los valores de Δf , $\{a_n\}_{n=1, \dots, N}$ y M que hacen mínima la función de peso $p(f)$ que es igual al histograma de la función, $f(\theta)$

$$\min(p(f)) = \frac{1}{M \Delta f |\sum_{n=1}^N n a_n (-1)^{n+1}|}$$

19. Método de diseño y optimización de lente de foco extendido, según reivindicación 18, donde las condiciones generales para optimización de la lente comprenden: aumentar el valor de la suma $\sum_{n=1}^N a_n^2$, aumentar el valor de la suma $|\sum_{n=1}^N n a_n (-1)^{n+1}|$, diseñar la lente con el mayor número (M) posible que se pueda fabricar y modificar el parámetro Δf que controla la profundidad de foco.

20. Método de diseño y optimización de lente de foco extendido, según reivindicación 18, donde Δf que controla la profundidad de foco aumenta hasta un punto en

que empieza a empeorar la calidad de la imagen por falta de nitidez.

21. Método, según reivindicación 20, donde Δf es aproximadamente un 5% del valor de la focal principal.
- 5 22. Método, según reivindicación 18, donde M es un número par.
23. Método, según reivindicación 22, donde M es un número potencia de 2.
- 10 24. Método, según reivindicación 23, donde M está comprendido entre 16 y 64.
25. Método, según reivindicación 18, donde $a_1 = 1, a_j = 0 \forall j > 1$
26. Método, según reivindicación 18, donde $a_n = \frac{8}{\pi^2 n^2} \quad n = 1, 3, 5, \dots$
- 15 27. Método, según reivindicación 18, en la que dicha lente es una lente oftálmica que presenta también una fase refractiva.
28. Método, según reivindicación 18, en la que dicha lente es una lente de contacto
- 20 que presenta también una fase refractiva.
29. Método, según reivindicación 18, en la que dicha lente es una lente intraocular que presenta también una fase refractiva.
- 25 30. Método, según reivindicación 27, donde una de las superficies o ambas superficies pueden ser esféricas
31. Método, según reivindicación 27, la superficie refractiva puede ser tórica o asfero-tórica
- 30 32. Método, según cualquiera de las reivindicaciones 28 y 29, donde la fase refractiva viene dada en una primera superficie de la lente y la fase difractiva en una segunda superficie
- 35 33. Método, según cualquiera de las reivindicaciones 28 y 29, las dos superficies son refractivas y sobre ellas se graba el perfil difractivo dando lugar a dos superficies

difracto-refractivas.

34. Método, según cualquiera de las reivindicaciones 27 a 32, donde la lente diseñada es apodizada.

5

35. Método, según reivindicación 34, donde la apodización se realiza multiplicando una función de apodización estándar como $z(p) = 1 - \rho^{2n+1}$, $n \in N$, donde ρ es la coordenada radial normalizada a la apertura de la lente, a la ecuación general de elevación de la superficie difractiva.

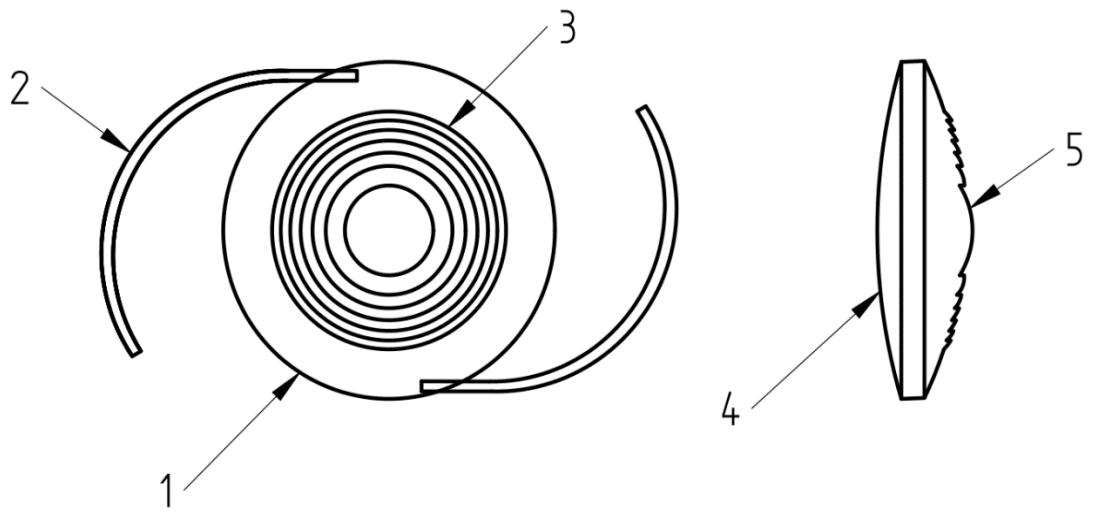
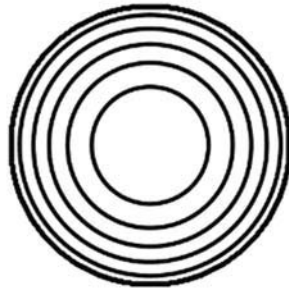


Fig.1



(a)



(b)



(c)

Fig.2

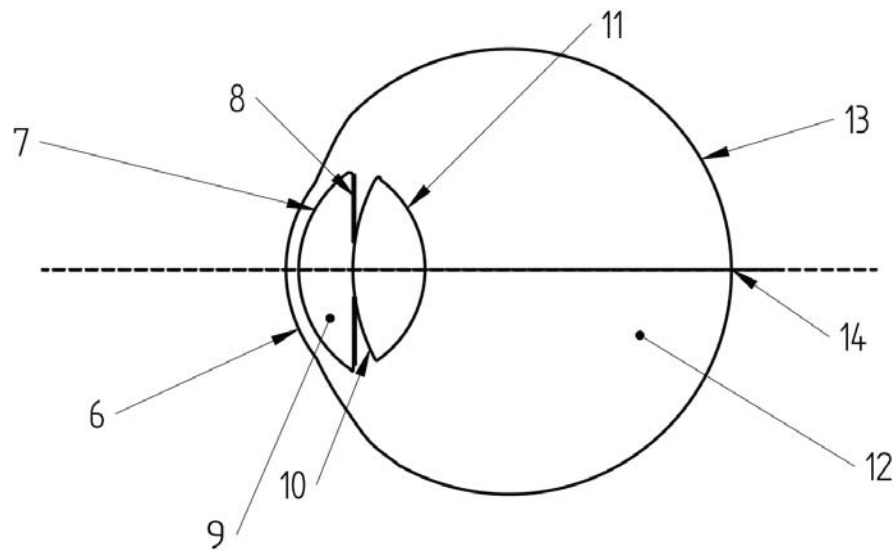


Fig.3

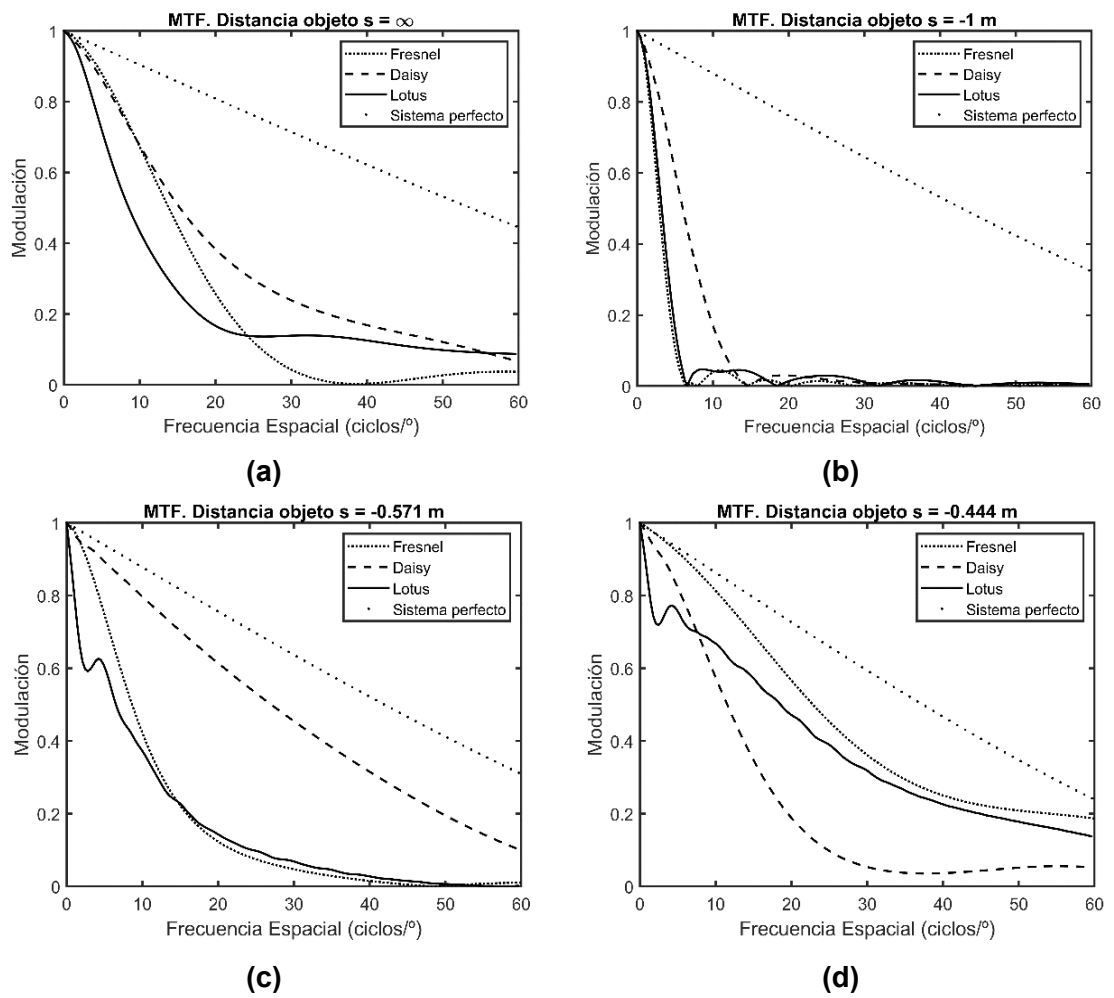


Fig.4

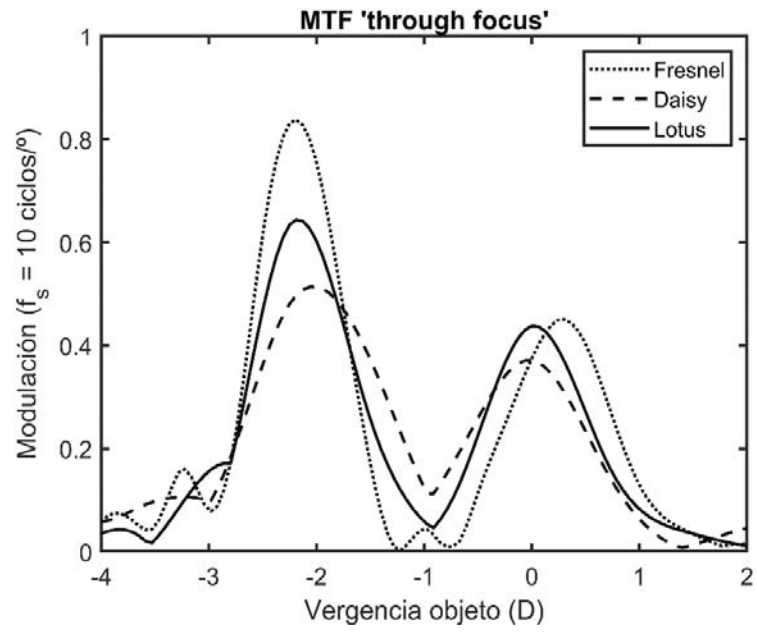


Fig.5

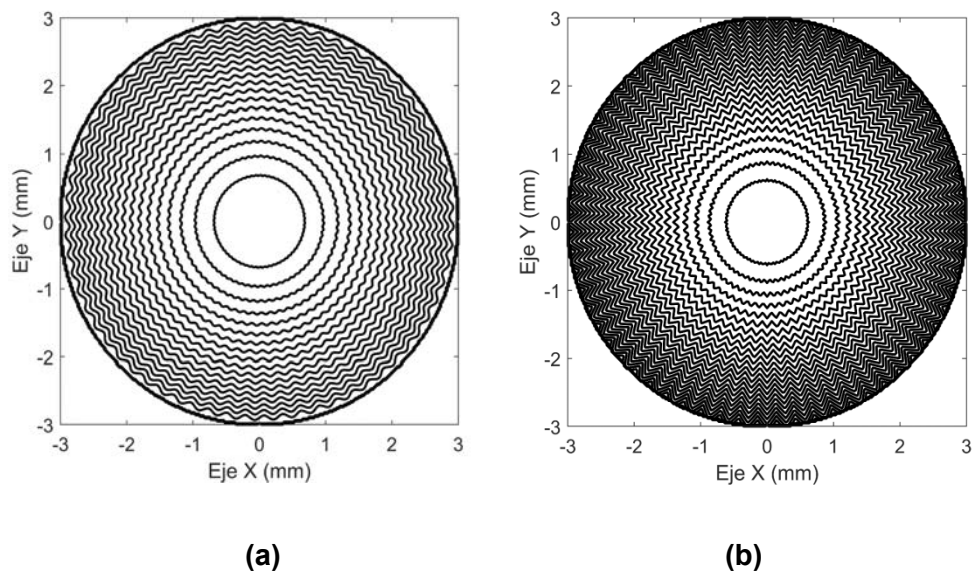


Fig.6