

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 739 386**

51 Int. Cl.:

A61F 9/008 (2006.01)

G02C 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.10.2008** **PCT/US2008/081421**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.05.2009** **WO09058755**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.10.2008** **E 08844582 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.05.2019** **EP 2211747**

54 Título: **Dispositivos para tratamientos refractivos de la presbicia**

30 Prioridad:

29.10.2007 US 643 P

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

30.01.2020

73 Titular/es:

LIANG, JUNZHONG (100.0%)

**45 Kootenai Drive
Fremont, CA 94539, US**

72 Inventor/es:

LIANG, JUNZHONG

74 Agente/Representante:

RUO , Alessandro

ES 2 739 386 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

Dispositivos para tratamientos refractivos de la presbicia

5 **Campo de la invención**

[0001] Esta solicitud se refiere a la corrección refractiva de los ojos humanos, en particular, para tratamientos refractivos de la presbicia.

10 **Antecedentes de la invención**

[0002] La presbicia es un problema de la visión de cerca relacionado con la edad, debido a la reducción progresiva de la capacidad del ojo para enfocar, con la consiguiente dificultad a la hora de leer a la distancia normal. Una corrección refractiva eficaz de la presbicia debe proporcionar un enfoque simultáneo para la visión de lejos, intermedia y de cerca en todas las condiciones de tamaños de pupila.

[0003] Las lentes intraoculares difractivas (LIO), tales como las descritas en la patente de EE. UU. n.º 5.116.111 de Michael Simpson y John Futhey y en el documento US 2006/0116764A1 de Michael Simpson pueden proporcionar una corrección simultánea de enfoque doble (visión de lejos y visión de cerca) para la presbicia, pero tienen dos desventajas inherentes: la visión nocturna degradada con deslumbramiento nocturno causado por la dispersión de luz en las uniones de las zonas difractivas en la superficie de la lente, y un punto ciego a una distancia intermedia entre los puntos focales lejano y cercano.

[0004] Valdmarr Portney propuso en la patente de EE. UU. n.º 5.225.858 y la patente de EE.UU. n.º 6.557.998B2 diseños multifocales controlando la distribución de luz para la visión de lejos, intermedia y de cerca a través de un tamaño de apertura diferente de una lente. Estos diseños de lente pueden rendir mejor para la visión intermedia que las LIO difractivas de Simpson, pero también se sabe que son de rendimiento inferior en la visión de cerca. Además, las lentes de Portney no logran su máximo potencial ya que están basadas en un simple trazado geométrico de rayos, sin tener en cuenta el efecto de difracción de la propagación de la luz.

[0005] También se propusieron lentes asféricas en la patente de EE.UU. n.º 6.923.539B2 de Michael Simpson y en la patente de EE.UU. n.º 5.166.711 y 6.409.340B1 de Valdmarr Portney. Estas lentes tienen una distribución de poder de refracción periódica a través de una lente. Aunque la lente de Simpson puede aumentar la profundidad de enfoque para una lente monofocal, tal y como se ilustra en la Figura 9 de la patente de EE.UU. n.º 6.923.539B2, este tipo de lentes no suele ser adecuado para la corrección de la presbicia.

[0006] La aberración esférica a través de la pupila de un ojo produce un poder de enfoque diferente en diferentes radios de la pupila. La aberración esférica negativa a través de la pupila de un ojo se propuso para la mitigación de la presbicia por parte de Seema Somani y Kingman Yee en la patente de EE. UU. n.º 7.261.412 B2. En ese documento, los inventores se percataron de que la aberración esférica negativa a través de toda la pupila puede desviar el centro de la distancia hiperfocal desde una distancia lejana hasta una intermedia, porque la aberración esférica negativa produce poder de enfoque para la visión de lejos en el centro de la pupila hasta la visión intermedia en la periferia de la pupila.

[0007] Sin embargo, la inducción de la aberración esférica a través de toda la pupila de un ojo tiene al menos dos limitaciones para las correcciones de la presbicia. En primer lugar, la cantidad total de aberración esférica inducida a través de la pupila no puede ser demasiado fuerte como para causar síntomas nocturnos como el deslumbramiento, halos y destellos, lo que supone una de las razones fundamentales por las que las lentes con aberración esférica significativa no se han utilizado en las LIO multifocales y lentes de contacto para tratamientos de la presbicia. En segundo lugar, el método de Somani y Yee en la patente de EE.UU. n.º 7.261.412 B2 no suele ser suficiente para los tratamientos de la presbicia, porque la pequeña cantidad de aberración esférica a través de toda la pupila solo desvía el centro de la distancia hiperfocal y no aumenta la profundidad de enfoque. Adicionalmente, los métodos actualmente conocidos de aberración esférica para las correcciones de la presbicia no han logrado abordar los problemas de los síntomas nocturnos inducidos (deslumbramiento, halos, destellos) y aumentar la profundidad de enfoque de un ojo para la visión de lejos, visión intermedia y visión de cerca, haciendo, de este modo, que tales soluciones sean menos que deseables.

[0008] Una lente de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1 se enseña en el documento US 2004/233382 A1.

[0009] Por consiguiente, aunque en la técnica se conocen muchas configuraciones y métodos para la corrección de la visión para el tratamiento de la presbicia, todos ellos o casi todos presentan una o más desventajas. De este modo, sigue existiendo la necesidad de proporcionar configuraciones y métodos mejorados para la corrección de la visión para el tratamiento de la presbicia.

Sumario de la invención

[0010] La presente invención se define en la reivindicación 1 y se refiere a dispositivos para corregir la presbicia en los que se cambian las propiedades ópticas en la pupila de un ojo de manera que una sección central de la pupila se trata de manera diferente a una sección periférica, y en donde el tratamiento de la sección central incluye la inducción de aberración esférica en la sección central de la pupila.

[0011] En un aspecto de la divulgación, un método para tratar la presbicia del ojo de un paciente (en donde el ojo tiene una pupila natural que comprende una sección central de pupila igual a o de menos de 4 mm de diámetro y una sección circundante de pupila periférica para recibir luz en condiciones de poca luz) incluye una etapa para inducir aberración esférica en la sección central de la pupila, y otra etapa para preservar o reducir las aberraciones de alto orden en la sección de la pupila periférica que están presentes antes del tratamiento.

[0012] Los métodos particularmente contemplados pueden comprender además una etapa para atenuar o bloquear el paso de la luz al ojo a través de la sección de la pupila periférica. En la mayoría de los casos, la aberración esférica inducida en la sección central de la pupila es una aberración esférica positiva o una aberración esférica negativa y, cuando se desea, la aberración esférica inducida en la sección central de la pupila comprende una aberración esférica positiva en una primera zona y una aberración esférica negativa en una segunda zona. De este modo, la sección central de la pupila puede estar dividida en dos secciones ópticas concéntricas que tienen aberraciones esféricas de signos opuestos. Lo que se prefiere aún más es que la aberración esférica inducida en la sección central de la pupila se diseñe de forma personalizada y en función del tamaño de la pupila de un ojo bajo al menos una condición de luminancia. Los métodos contemplados incluirán además una etapa para reducir o eliminar al menos uno de un error de enfoque y astigmatismo en el ojo, y/o una etapa para reducir o eliminar las aberraciones de Zernike de tercer orden en el ojo. En algunos aspectos, los métodos contemplados pueden implementarse en una corrección de la visión con láser en la que un procesador genera un patrón de ablación de la energía del láser para la ablación de un tejido corneal del ojo, en donde el patrón de ablación se basa, al menos en parte, en un perfil de refracción determinado a través de la pupila, y en donde la energía del láser se dirige hacia el tejido corneal del ojo para lograr el patrón de ablación generado.

[0013] Por consiguiente, se contempla una lente oftálmica correctiva multifocal y refractiva en la que la lente está configurada para proporcionar un poder dióptrico de referencia que se extiende a través de la lente en una cantidad eficaz para corregir un defecto de visión de lejos, y en donde la lente está configurada además para tener una aberración esférica en una sección central de la lente en una cantidad eficaz para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo, y en donde la lente sigue estando configurada además como una lente implantable o una lente que puede llevarse puesta.

[0014] En otro aspecto de la divulgación, un método para tratar la presbicia del ojo de un paciente (en donde el ojo tiene una pupila natural que comprende una sección central de la pupila igual a o de menos de 4 mm de diámetro y una sección circundante de la pupila periférica para recibir luz en condiciones de poca luz) incluirá una etapa para producir un primer conjunto de poder de enfoque y aberración esférica en la sección central de la pupila y un segundo conjunto de poder de enfoque y aberración esférica en la sección de la pupila periférica, en donde los conjuntos primero y segundo son distintos.

[0015] Más preferentemente, la aberración esférica en la sección central de la pupila se selecciona para aumentar la profundidad de enfoque del ojo para un tamaño de pupila igual o inferior a 4 mm de diámetro, y en donde el poder de enfoque y la aberración esférica en la sección de la pupila periférica de la pupila se seleccionan para mejorar la calidad de imagen para la visión de lejos en condiciones de poca luz y/o la aberración esférica inducida en la sección central de la pupila se determina de forma personalizada según el tamaño de la pupila de un ojo bajo al menos una condición de luminancia.

[0016] Cuando se desea, se contempla que este tipo de métodos incluyan además una etapa para configurar al menos uno de los conjuntos primero y segundo para reducir o eliminar al menos uno de un error de enfoque y astigmatismo en el ojo, y/o una etapa para configurar al menos uno de los conjuntos primero y segundo para reducir o eliminar las aberraciones de Zernike de tercer orden en el ojo. Como se ha expuesto anteriormente, los métodos contemplados pueden implementarse en una corrección de la visión con láser en la que un procesador genera un patrón de ablación con la energía del láser para la ablación de un tejido corneal del ojo, en donde el patrón de ablación se basa, al menos en parte, en un perfil de refracción determinado a través de la pupila, y en donde la energía del láser se dirige hacia el tejido corneal del ojo para lograr el patrón de ablación generado.

[0017] Por consiguiente, se contempla una lente oftálmica correctiva multifocal y refractiva en la que la lente tiene una pluralidad de secciones ópticas concéntricas, en donde al menos dos de las secciones ópticas tienen distintos conjuntos de poder de enfoque y aberración esférica, y en donde la lente está configurada como una lente implantable o una lente que puede llevarse puesta.

[0018] Varios objetos, características, aspectos y ventajas de la presente invención resultarán más evidentes a partir de la siguiente descripción detallada de las realizaciones preferentes de la invención.

Breve descripción de los dibujos

[0019]

- 5 La FIG. 1 muestra las MTF (función de transferencia de modulación, por sus siglas en inglés) calculadas y las imágenes retinianas de un ojo para visión de lejos, visión intermedia y visión de cerca con un elemento refractivo que restringe la pupila efectiva de un ojo e induce aberración de alto orden (aberración esférica) en la pupila central de conformidad con la presente invención. Se da por supuesto que el ojo no tiene capacidad de acomodación.
- 10 La FIG. 2a muestra la agudeza estimada para un ojo con un elemento refractivo que restringe el tamaño de la pupila de un ojo a 1,6 mm e induce una aberración esférica positiva en el área central de la pupila y un desplazamiento focal de 4,2 D.
- 15 La FIG. 2b muestra la agudeza estimada para un ojo con un elemento refractivo que restringe el tamaño de la pupila de un ojo a 1,6 mm e induce una aberración esférica negativa en el área central de la pupila.
- 20 La FIG. 3a muestra una vista esquemática de un elemento óptico para implantarse o ponerse en un ojo para tratamientos de la presbicia de conformidad con la presente invención. El elemento refractivo restringe el tamaño de la pupila de un ojo para la visión fotópica e induce aberración esférica en la pupila central.
- 25 La FIG. 3b muestra una vista esquemática de un elemento óptico para implantarse o ponerse en un ojo para tratamientos de la presbicia de conformidad con la presente invención. El elemento refractivo restringe el tamaño de la pupila de un ojo para la visión fotópica e induce aberración esférica en la pupila central. El elemento óptico también incluye una sección exterior transparente para aumentar la eficacia de los fotones para la visión escotópica (visión nocturna).
- 30 La FIG. 4 muestra un método para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo con un implante intracorneal en combinación con una corrección refractiva con láser.
- 35 La FIG. 5 muestra una vista esquemática de un método para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo al restringir la pupila efectiva de un ojo e inducir la aberración esférica en signos opuestos en dos secciones ópticas que son transparentes.
- 40 La FIG. 6 muestra las MTF calculadas de un ojo con un elemento óptico para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante la restricción de la pupila efectiva de un ojo en combinación con la inducción de aberración esférica en signos opuestos en dos secciones ópticas.
- 45 La FIG. 7 muestra la agudeza estimada en función de las MTF calculadas de un ojo mostrado en la FIG. 6.
- 50 La FIG. 8a muestra una vista esquemática de un elemento óptico para implantarse o ponerse en un ojo para tratamientos de la presbicia de conformidad con una presente invención. El elemento refractivo restringe el tamaño de la pupila de un ojo para la visión fotópica e induce aberración esférica en signos opuestos en dos secciones ópticas.
- 55 La FIG. 8b muestra una vista esquemática de otro elemento óptico para implantarse o ponerse en un ojo para tratamientos de la presbicia de conformidad con la presente invención. El elemento refractivo restringe el tamaño de la pupila de un ojo para la visión fotópica e induce aberración esférica en signos opuestos en dos secciones ópticas. El elemento óptico también incluye una sección transparente exterior para aumentar la eficacia de los fotones para la visión escotópica (visión nocturna).
- 60 La FIG. 8c muestra otra realización que tiene una sección óptica clara que reemplaza la máscara opaca anular 83 de la FIG. 8a.
- 65 La FIG. 9 muestra un método para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante la inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de la aberración de alto orden en la periferia de la pupila.
- La FIG. 10 muestra un proceso para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante la inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de la aberración de alto orden en la periferia de la pupila.
- La FIG. 11a muestra las MTF de un ojo para un objeto lejano y para un objeto cercano en un ejemplo para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante la inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila.

La FIG. 11b muestra imágenes retinianas calculadas de gráficos de agudeza en una retina de un ojo para visión de lejos y visión de cerca en un ejemplo para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila.

La FIG. 12 muestra la agudeza estimada de un ojo con un elemento óptico para el tratamiento de la presbicia en 5 tamaños de pupila diferentes en un ejemplo para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila.

La FIG. 13a muestra las MTF de un ojo para un objeto lejano y un objeto cercano en una realización para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila.

La FIG. 13b muestra imágenes retinianas calculadas de gráficos de agudeza en una retina de un ojo para un objeto lejano y un objeto cercano en una realización para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila.

La FIG. 14 muestra la agudeza estimada de un ojo con un elemento óptico para el tratamiento de la presbicia en 6 tamaños de pupila diferentes en una realización para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila.

La FIG. 15 muestra las MTF de un ojo para un objeto lejano, intermedio y cercano en otra realización más para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila.

La FIG. 16 muestra la agudeza estimada de un ojo con un elemento óptico para el tratamiento de la presbicia en 5 tamaños de pupila diferentes en otra realización más para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila.

La FIG. 17a muestra una vista esquemática de un elemento óptico para la corrección de la presbicia que comprende dos secciones con aberración esférica controlada. La tercera sección exterior puede o no contener aberración esférica.

La FIG. 17b muestra una realización de una lente de contacto de color para tratamientos de la presbicia.

La FIG. 18 muestra un método para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y sin cambiar las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila.

La FIG. 19 muestra un proceso para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y sin cambiar las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila. A menudo se necesita un desplazamiento focal en la sección exterior, dependiendo de la aberración de alto orden de un ojo individual.

La FIG. 20a muestra las MTF de un ojo bajo una corrección refractiva que induce aberración esférica negativa significativa en la pupila central en dos realizaciones: con o sin desplazamiento focal en la periferia de la pupila. Se sabe que el ojo tiene una aberración esférica negativa de 4 μ m para una pupila de 6 mm.

La FIG. 20b muestra imágenes retinianas de gráficos de agudeza en un ojo bajo una corrección refractiva que induce una aberración esférica negativa significativa en la pupila central. Excepto por la aberración esférica inducida en la pupila central, el elemento óptico tiene una corrección esfero-cilíndrica a lo largo de toda la pupila del ojo.

La FIG. 20c muestra imágenes retinianas de gráficos de agudeza en un ojo bajo una corrección refractiva que induce aberración esférica significativa en la pupila central. Además de la aberración esférica inducida en la pupila central y una corrección esfero-cilíndrica a lo largo de toda la pupila, el elemento óptico tiene un desplazamiento focal en la periferia de la pupila que está determinada de forma personalizada en función de las aberraciones de alto orden en un ojo.

La FIG. 21a muestra las MTF de un ojo para la visión de lejos (0 D) bajo una corrección refractiva que induce una aberración esférica positiva significativa en la pupila central en dos realizaciones, que difieren en el desplazamiento focal en la periferia de la pupila (véase la Tabla 6).

La FIG. 21b muestra imágenes retinianas de gráficos de agudeza en un ojo bajo una corrección refractiva que induce una aberración esférica positiva significativa en la pupila central.

La FIG. 21c muestra imágenes retinianas de unos gráficos de agudeza en un ojo bajo una corrección refractiva que induce una aberración esférica positiva significativa en la pupila central. Además de la aberración esférica inducida en la pupila central y una corrección esfero-cilíndrica a través de toda la pupila, el elemento óptico también tiene un desplazamiento focal en la periferia de la pupila que se determina de forma personalizada en función de las aberraciones de alto orden en un ojo.

La FIG. 22 muestra un elemento óptico para el tratamiento de la presbicia para un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y un desplazamiento personalizado del poder esférico en la periferia de la pupila en función de la aberración de alto orden en un ojo individual.

La FIG. 23 muestra una vista esquemática de un método para tratamientos de la presbicia con aberración esférica positiva inducida a lo largo de la pupila de un ojo y un desplazamiento focal para establecer la mejor calidad de imagen de un ojo en el punto lejano.

La FIG. 24 muestra las MTF de un ojo para tres tamaños de pupila para tres distancias de objetos diferentes.

La FIG. 25 muestra la agudeza estimada de un ojo con un elemento óptico para el tratamiento de la presbicia especificado en la tabla 7.

La FIG. 26 muestra una vista esquemática de un elemento óptico para la corrección de la presbicia que comprende una aberración esférica positiva a lo largo de la pupila de un ojo. La sección exterior puede o no contener aberración esférica.

Descripción detallada de la invención

Mejora de la profundidad de enfoque para los tratamientos de la presbicia restringiendo el tamaño de la pupila e induciendo aberración esférica dentro de la pupila pequeña de un ojo

[0020] La propiedad óptica de un ojo con un elemento refractivo generalmente se puede describir mediante una función de pupila compleja $P(r)$ tal como

$$P(r) = A(r) * \exp(i 2\pi \phi(r)/\lambda) * S(r) * \exp(i 2\pi W(r)/\lambda), \quad (1)$$

donde r es el radio polar a través de la pupila de un ojo. $A(r)$ y $\phi(r)$ representan la función de transmitancia de amplitud y la distribución de frente de onda de un elemento refractivo, respectivamente. $S(r)$ y $W(r)$ son la función de transmitancia de amplitud (efecto Stiles-Crawford) y los errores de frente de onda a través de la pupila de un ojo individual, respectivamente. Solo incluimos la componente radial de la función de la pupila a través de la pupila por motivos de simplicidad.

[0021] Describimos un método para aumentar la profundidad de enfoque del ojo reduciendo el tamaño de la pupila efectiva de un ojo para la visión fotópica e induciendo aberración esférica en el área central de la pupila. La reducción (restricción) del tamaño de la pupila de un ojo se puede expresar mediante una función de transmitancia de amplitud $A(r)$ en la Ec. 1 como

$$A(r) = \text{circ}(r/r_0) \quad (2)$$

donde r_0 es el radio de la pupila reducida, y $\text{circ}(r/r_0)$ es una función circular, que es igual a 1 si r es igual o menor que r_0 y es igual a cero si r es mayor que r_0 . Si el tamaño de apertura $2r_0$ es más pequeño que una pupila natural de un ojo en condiciones fotópicas, la apertura del elemento refractivo en realidad determina el tamaño de la pupila efectiva de un ojo. La inducción de la aberración esférica dentro del área restringida de la pupila se puede expresar mediante

$$\phi(r) = c_1 * (r/r_0)^4 \quad (3)$$

El coeficiente c_1 mide la cantidad de aberración esférica a través de la pupila dentro de la apertura restringida.

[0022] Por supuesto, un elemento óptico para la corrección refractiva a menudo incluye también una corrección esfero-cilíndrica convencional. Las correcciones esfero-cilíndricas convencionales no están incluidas en nuestra descripción por motivos de simplicidad. Sin embargo, las correcciones para la presbicia pueden incluir un desplazamiento focal para establecer el punto focal lejos del punto lejano de un ojo. Combinando el desplazamiento focal y la aberración esférica inducida podemos obtener una distribución de frente de onda para los tratamientos de la presbicia como

$$\phi(r) = c1 * (r/r_0)^4 + c2 * (r/r_0)^2 \quad (4)$$

donde c2 mide el desplazamiento focal.

- 5 **[0023]** En un ejemplo, elegimos una apertura restringida de 1,6 mm ($r_0 = 0,8$ mm). Dentro de un tipo tan pequeño de pupila restringida, es razonable suponer que el efecto Stile-Crawford ($S(r)$) es una constante y que los errores de fase de un ojo ($W(r)$) no tienen aberraciones de alto orden, tales como la aberración esférica, y el error de frente de onda de un ojo es simplemente descrito por un error de enfoque para diferentes posiciones focales, es decir,

10
$$W(r) = c3 * (r/r_0)^2 \quad (5)$$

mientras que c3 mide el error de enfoque para objetos a diferentes distancias de visualización.

- 15 **[0024]** Una aberración esférica positiva, que hace que el ojo tenga más poder de refracción en el centro que en el borde, de 1,34 μ m a través de la pupila restringida ($c1 = 1,34 \mu$ m) puede inducirse dentro de la pupila restringida, lo que también se puede expresar como 0,1 ($Z12(r) + 3,87 * Z4(r)$) en polinomios de Zernike. Z12 y Z4 son polinomios de Zernike en forma de $Z12(r) = 2,236(6 * r^4 - 6 * r^2 + 1)$ y $Z4(r) = 1,732(2 * r^2 - 1)$.

- 20 **[0025]** La combinación de una pequeña pupila restringida y la aberración esférica inducida puede producir una gran profundidad de enfoque para un tratamiento de la presbicia. Debido a que una aberración esférica positiva desviará el enfoque del ojo a mayor hipermetropía, se puede incluir un desplazamiento focal de aproximadamente 4,2 D para hacer que el ojo tenga la mejor calidad de imagen para la visión de lejos. Sin la aberración esférica positiva ($c1 = 0$), el desplazamiento focal haría que el ojo se enfocara en un objeto cercano a 24 cm.

- 25 **[0026]** La FIG. 1 muestra la MTF calculada (función de transferencia de modulación, columna izquierda) e imágenes retinianas de un ojo (columnas media y derecha) sin acomodación de un ojo para visión de lejos (hacia el infinito: fila superior; 3 metros de distancia: 2ª fila), visión intermedia (0,7 metros de distancia: 3ª fila; 0,5 metros de distancia: 4ª fila) y visión de cerca (0,33 metros de distancia: fila inferior). Las MTF del ojo se calculan a partir de la ecuación basada en la función de la pupila (1), (2), (4) y (5) con los supuestos de que $s(r) = 1$. La abscisa de MTF es la frecuencia espacial en ciclos/grados. Las letras del gráfico de agudeza son para una agudeza de 20/10 (la más pequeña), 20/15, 20/20, 20/40 y 20/80 (la más grande), respectivamente.

- 30 **[0027]** Para que los sujetos humanos reconozcan las letras en la retina, el contraste para cada letra en la imagen retiniana debe ser mayor que un umbral de retina. Si suponemos que los umbrales de contraste para una retina normal son del 9 % para 20/20, 5 % para 20/30 y 2,5 % para 20/40 de acuerdo con datos experimentales conocidos, podemos estimar la agudeza del ojo a partir de la función de modulación-transferencia que se muestra en la primera columna en la FIG. 1.

- 35 **[0028]** La FIG. 2 muestra la agudeza estimada para un ojo con un elemento refractivo que restringe el tamaño de la pupila a 1,6 mm e induce una aberración esférica positiva y un desplazamiento focal de 4,2 D. Se observan tres características importantes. En primer lugar, el ojo tiene una excelente visión (20/20) para objetos lejanos con una profundidad de enfoque de más de 1 dioptría, y no se esperarían problemas de visión con luz nocturna tales como deslumbramiento, halos. En segundo lugar, el ojo tiene una visión de cerca e intermedia aceptable con una agudeza estimada de 20/30 de 1 metro a 0,33 metros. Es posible que el ojo tenga una agudeza de 20/40 hasta 0,2 metros delante de un ojo.

- 40 **[0029]** En otro ejemplo, elegimos una apertura restringida de 1,6 mm ($r_0 = 0,8$ mm) y una aberración esférica negativa, lo que hace que el ojo tenga más poder de refracción en el borde que en el centro, de 1,34 μ m a través de la pupila restringida ($c1 = -1,34 \mu$ m), y un desplazamiento focal de aproximadamente -1,2 dioptrías que reduce el poder de refracción de la óptica del ojo. La FIG. 2b muestra la agudeza estimada para un ojo con este tipo de corrección refractiva. Se observan dos características importantes. En primer lugar, el ojo tiene una excelente agudeza de visión de cerca (20/20) para el objeto cercano. En segundo lugar, un desplazamiento focal de aproximadamente -1.2 D hará que el ojo sea de 20/30 o más desde la visión de lejos hasta la visión de distancia intermedia.

- 50 **[0030]** Mirando a la Fig. 2a y la FIG. 2b, se puede apreciar fácilmente un método para obtener una visión binocular excepcional para objetos cercanos y lejanos al corregir un ojo con una aberración esférica positiva y el otro ojo con una aberración esférica negativa. Se debe hacer hincapié en que la restricción del tamaño de la pupila así como la aplicación de un desplazamiento focal son necesarios para ambos ojos.

- 55 **[0031]** La FIG. 3a muestra un elemento óptico para implantarse o ponerse en un ojo para tratamientos de la presbicia de conformidad con la presente invención. El elemento refractivo comprende una sección óptica central clara 31 que no solo proporciona correcciones esfero-cilíndricas convencionales, sino que también induce aberración esférica dentro del centro de la pupila, y una máscara anular 32 que bloquea o atenúa la luz más allá de la sección óptica central y hasta la pupila natural de un ojo 33 bajo una condición mesópica (condiciones fotópicas con muy poca luz). El elemento refractivo restringe el tamaño de la pupila de un ojo para la visión fotópica e induce aberración

esférica en la pupila central. El diámetro de la sección óptica central D1 está entre 1,4 mm y 2 mm. El diámetro exterior de la sección anular D2 está entre 3,5 mm y 6 mm, dependiendo de la pupila más grande de los ojos individuales en condiciones mesópicas (condición fotópica con poca luz). La óptica en la sección óptica central puede incluir un desplazamiento focal, dependiendo de la cantidad inducida de aberración esférica.

[0032] La FIG. 3b muestra un elemento óptico para implantarse o ponerse en un ojo para tratamientos de la presbicia de conformidad con la presente invención. El elemento refractivo comprende una sección óptica central clara 34 que no solo proporciona correcciones esfero-cilíndricas convencionales, sino que también induce aberración esférica dentro del centro de la pupila, y una máscara anular 35 que bloquea o atenúa la luz más allá de la sección óptica central y hasta la pupila natural de un ojo 33 para condiciones mesópicas. La inducción de aberración esférica se puede lograr utilizando al menos una superficie asférica en la fabricación de lentes. Más allá de la pupila natural del ojo para la visión mesópica, hay una sección transparente 36 que permite que el ojo capte fotones para condiciones escotópicas (visión nocturna). El diámetro de la sección óptica central D1 está entre 1,4 mm y 2 mm. El diámetro exterior de la sección anular D2 está entre 3,5 mm y 6 mm, dependiendo de la pupila más grande de los ojos individuales en condiciones mesópicas (condición fotópica con poca luz). La óptica en la sección óptica central puede incluir un desplazamiento focal que depende de la cantidad inducida de aberración esférica.

[0033] El elemento óptico de la FIG. 3a y la FIG. 3b puede ser una lente intraocular (LIO) hecha con un proceso convencional para lentes esféricas y asféricas conocido en la técnica anterior. Al menos una superficie de la lente debe ser asférica para inducir la aberración esférica deseada. La sección anular opaca o parcialmente transparente se puede obtener al recubrir o teñir una parte de una sección de lente clara, y también se puede obtener intercalando una capa opaca en una lente clara.

[0034] La restricción del tamaño de la pupila y la inducción de aberración esférica dentro de una pupila pequeña de un ojo también se puede lograr mediante una LIO en combinación con un implante intracorneal. La LIO proporcionará un desplazamiento focal y cierta cantidad de aberración esférica en el centro de la lente, además de una corrección esfero-cilíndrica convencional. El control de la transmitancia de la luz en una sección anular se puede lograr mediante un dispositivo como un implante intracorneal implantado en la córnea.

[0035] La restricción del tamaño de la pupila y la inducción de aberración esférica dentro de una pupila pequeña de un ojo también puede lograrse mediante un implante intracorneal en combinación con un procedimiento como la corrección de la visión con láser. Se puede utilizar un implante intracorneal para bloquear o atenuar la luz en una zona anular a través de la pupila de un ojo. Se puede utilizar una cirugía refractiva con láser para producir una cantidad deseada de aberración esférica, así como un desplazamiento focal deseado para establecer correctamente la distancia hiperfocal de un ojo. Un método para este tipo de procedimiento se muestra en la FIG. 4, que comprende las etapas de: 1) implantar un implante intracorneal en un ojo 41; 2) medir la aberración de onda del ojo 42; 3) determinar un desplazamiento focal deseado 44 así como una cantidad deseada de aberración esférica 43 para producirse mediante una cirugía refractiva con láser; 3) realizar un procedimiento de cirugía refractiva con láser en función del error de enfoque determinado y la aberración esférica. La corrección refractiva de las correcciones esfero-cilíndricas convencionales también se puede realizar en el procedimiento con láser.

Profundidad de enfoque mejorada de un ojo mediante inducción de aberración esférica con signos opuestos en una pluralidad de zonas ópticas

[0036] Los dispositivos que reducen la pupila efectiva de un ojo a menos de 2 mm pueden aumentar la profundidad de enfoque para los tratamientos de la presbicia, pero también reducir considerablemente la luz total en un ojo. La figura 5 muestra un método que utilizará una pupila natural relativamente grande de un ojo y aumentará la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica con signos opuestos en una pluralidad de zonas ópticas. La óptica de un ojo bajo condiciones fotópicas se divide en 3 zonas: la zona central 51, la zona media 52 y la zona exterior 53. En este método de corrección refractiva, tanto la 51 como la 52 son claras y transparentes a la onda de luz, mientras que la sección exterior 53 bloquea o atenúa la luz en la periferia de la pupila. Además de una corrección esfero cilíndrica convencional, las secciones ópticas claras 51 y 52 tendrán diferentes desplazamientos focales y aberración esférica con signos opuestos. La pupila natural de un ojo en una condición de visualización mesópica se muestra mediante 54.

[0037] En un ejemplo, la sección central clara 51 tiene un diámetro de 1,6 mm y una aberración esférica positiva de aproximadamente 1,34 μm (o $0,1(Z12(r) + 3,87 Z4(r))$) y un desplazamiento focal de 4,0 dioptrías. Fuera de la sección clara central, la sección anular 52 es transparente y tiene un diámetro de 3 mm. La sección 52 tiene un poder de enfoque diferente (0 D) y una aberración esférica negativa de aproximadamente 4,3 μm (o $-0,32 (Z12(r) + 3,87 Z4(r))$) en el borde exterior de 52. Más allá de la 51 y 52 hay una sección de máscara anular que bloquea o atenúa la mayoría de la luz más allá de las secciones ópticas centrales para condiciones fotópicas. El diámetro exterior de la sección anular es de entre 3,5 mm y 6 mm, dependiendo de la pupila más grande de un ojo individual en condiciones mesópicas (condición fotópica con poca luz).

[0038] La figura 6 muestra la MTF calculada de un ojo sin acomodación para visión de lejos (hacia el infinito: fila superior; 3 metros de distancia: 2ª fila), visión intermedia (0,7 metros de distancia: 3ª fila; 0,5 metros de distancia: 4ª fila) y visión de cerca (0,33 metros de distancia: fila inferior). Se consideran tres tamaños de pupila: pupila de 1,5 mm a la izquierda, pupila de 2 mm en el medio y pupila de 3 mm a la derecha. La abscisa de los diagramas de MTF es la frecuencia espacial en ciclos/grados.

[0039] Se pueden apreciar tres características para este método de tratamientos de la presbicia. En primer lugar, el nuevo método tiene una calidad óptica y una profundidad de enfoque idénticas a la que se muestra en la FIG. 1 y la FIG. 2a cuando la pupila de un ojo es menor de 1,6 mm. En segundo lugar, el nuevo método ha mejorado la calidad de imagen para la visión de cerca y la visión intermedia para una pupila más grande, mostrada en las tres filas inferiores. En tercer lugar, el nuevo método ha reducido la calidad de imagen para la visión de lejos (dos filas superiores) por la noche, pero ha mejorado la eficacia de los fotones con un tamaño de pupila de 3 mm en lugar de 1,6 mm.

[0040] La FIG. 7 muestra la agudeza estimada en función del contraste retiniano calculado (MTF) de un ojo como los que se muestran en la FIG. 6. Consideramos el mismo tamaño de tres pupilas en la FIG. 6 para un intervalo de distancia focal desde infinito (0 D) hasta el objeto cercano a 0,25 metros (4 D). Se observa que la agudeza estimada es de 20/40 o mejor para los tres tamaños de pupila y en una distancia hiperfocal de 4 dioptrías. Para una pupila pequeña de 1,5 mm, la agudeza estimada es la misma que la que se muestra en la FIG. 2a. Para tamaños de pupila mayores de 1,6 mm, también se observa que hay tres regiones con mejor agudeza que 20/40: visión de lejos (<0,3 D), visión intermedia (~2 D) y visión de cerca (~3 D). Es más, el método descrito en la FIG. 5 permitirá más luz (aproximadamente 3,5x) para la visión con luz nocturna en comparación con los métodos con un tamaño de pupila pequeña de 1,6 mm.

[0041] La FIG. 8a muestra un elemento óptico para implantarse o ponerse en un ojo para tratamientos de la presbicia de conformidad con una presente invención. El elemento refractivo restringe el tamaño de la pupila de un ojo para la visión fotópica e induce aberración esférica con signos opuestos en dos secciones ópticas. La inducción de aberración esférica se puede lograr utilizando al menos una superficie asférica en la fabricación de lentes. El elemento refractivo comprende una sección óptica circular central 81, una sección óptica anular 82 y una máscara anular 83 que bloquea o atenúa la luz más allá de las secciones ópticas centrales y hasta la pupila natural de un ojo 84 en condiciones mesópicas. El elemento refractivo proporciona la corrección esfero-cilíndrica convencional, restringe el tamaño de la pupila de un ojo para la visión fotópica e induce aberración esférica con signos opuestos en dos secciones ópticas. El diámetro de la sección óptica central D1 está entre 1,4 mm y 2 mm. El diámetro exterior de la sección anular D2 está entre 2,5 mm y 3,5 mm, mientras que el diámetro exterior de la sección anular está entre 3,6 mm y 12 mm de diámetro.

[0042] La FIG. 8b muestra otro elemento óptico para implantarse o ponerse en un ojo para tratamientos de la presbicia de conformidad con la presente invención. A diferencia del dispositivo de la FIG. 8a, este dispositivo tiene una sección óptica clara 85 fuera de la sección de la máscara anular para aumentar la eficacia de los fotones para la visión escotópica (visión nocturna).

[0043] Otra realización se muestra en la FIG. 8c. A diferencia del dispositivo de la FIG. 8a, el dispositivo tiene una sección óptica clara 86 que reemplaza la máscara opaca anular 83. La sección 86 puede o no controlar las aberraciones de alto orden en la periferia de la pupila.

[0044] El elemento óptico en la FIG. 8a, la FIG. 8b y la FIG. 8c pueden ser una lente intraocular (LIO) o una lente de contacto fabricada con procesos convencionales para lentes esféricas y asféricas conocidas en la técnica anterior. Al menos una superficie de la lente debe ser asférica para inducir la aberración esférica deseada. La sección anular opaca o parcialmente transparente se puede obtener al recubrir o teñir una porción de una lente clara, y también se puede obtener intercalando una capa opaca en una lente clara.

Aumento de la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de la aberración de alto orden en la periferia de la pupila

[0045] Ignoramos las aberraciones de alto orden (aberración esférica) en los ojos individuales hasta ahora porque los métodos y dispositivos descritos contienen una máscara anular que limita el tamaño de la pupila efectiva de un ojo a un valor pequeño relativo que es menor o igual a 3 mm.

[0046] Los ojos humanos normales suelen tener una aberración esférica negativa para una pupila grande, como la mayoría de las lentes positivas. La magnitud de la aberración esférica es a menudo inferior a 4 μ m para una pupila de 6 mm (-0,3 (Z12+3,87 Z4)) en una población normal. La Tabla 1 muestra la aberración esférica en ojos humanos normales en diferentes tamaños de pupila con una aberración esférica de hasta 4 mm para una pupila de 6 mm en tres casos.

Tabla 1 Aberración esférica típica en ojos humanos normales

Tamaño de la pupila	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
Aberración esférica (μm) para $-0,1(Z_{12}(r)+3,87Z_4(r))$	-0,02	-0,08	-0,26	-0,65	-1,34
Aberración esférica (μm) para $-0,2(Z_{12}(r)+3,87Z_4(r))$	-0,03	-0,17	-0,53	-1,29	-2,68
Aberración esférica (μm) para $-0,3(Z_{12}(r)+3,87Z_4(r))$	-0,05	-0,25	-0,79	-1,94	-4,02

[0047] Se observa que la aberración esférica en una pupila pequeña (<3 mm de diámetro) para un ojo real es insignificante, pero puede ser significativa para una pupila mayor de 4 mm de diámetro. Por lo tanto, tenemos que lidiar con aberraciones de alto orden así como con aberración esférica en los ojos humanos, si diseñamos tratamientos de presbicia para un tamaño de pupila mayor a 3 mm.

[0048] Describimos métodos para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo para tratamientos de la presbicia dividiendo una pupila de ojo en una pluralidad de secciones y controlando la aberración esférica en ellas por separado. Tal y como se muestra en la FIG. 9, la óptica de un ojo en condiciones fotópicas se divide en dos secciones 91 (centro de la pupila) y 92 (periferia de la pupila). La pupila natural se muestra mediante el 93. El aumento de la profundidad de enfoque de un ojo puede lograrse mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de la aberración de alto orden en la periferia de la pupila al mismo tiempo. El diámetro del centro de la pupila D1 está entre 2 mm y 4 mm y el diámetro exterior de D2 está entre 3,5 mm y 6 mm.

[0049] La FIG. 10 muestra un proceso para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante la inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de la aberración de alto orden en la periferia de la pupila. En primer lugar, la aberración de onda 101 se mide con un aberrómetro de frente de onda. El aberrómetro de frente de onda informa no solo de las correcciones esfero-cilíndricas convencionales, sino también de las aberraciones de alto orden, como la aberración esférica, coma y etc. Las refracciones manifiestas, como los poderes esfero-cilíndricos, así como la amplitud de acomodación de un ojo, también se miden subjetivamente. En segundo lugar, se determina una corrección esfero-cilíndrica 102 para un elemento de corrección, con la cual el ojo se hace emétrope para la visión de lejos. En tercer lugar, las magnitudes deseadas de aberración esférica se determinan en al menos 2 secciones de la pupila, como en el centro 103 de la pupila y en la periferia 104 de la pupila. En cuarto lugar, la aberración esférica en el elemento de corrección se determina para el centro 105 de la pupila y para la periferia 106 de la pupila en función de las aberraciones de alto orden 101 del ojo, así como la aberración esférica deseada 103 y 104. En quinto lugar, se determinan los desplazamientos focales en el centro 107 de la pupila y en la periferia 108 de la pupila para el elemento de corrección. Por último, las correcciones de la presbicia guiadas por frente de onda 109 se pueden lograr para las correcciones de la visión con láser, lentes de contacto, gafas, lentes de contacto implantadas y lentes intraoculares en función de tres conjuntos de parámetros refractivos. Incluyen una corrección esférico-cilíndrica convencional a través de toda la pupila de un ojo 102, magnitudes de aberración esférica en el centro 105 de la pupila y la periferia 106 de la pupila, y los desplazamientos focales en el centro 107 de la pupila y en la periferia 108 de la pupila.

Tabla 2 Parámetros de una corrección refractiva para la presbicia

	Pupila central	Periferia de la pupila
Diámetro exterior (mm)	2,5	5
Aberración esférica deseada p^4 (μm)	-4	4
Desplazamiento focal (D)	-0,6	1,1

[0050] En una realización, se induce una aberración esférica negativa significativa en el centro de la pupila, mientras que se induce una aberración esférica positiva en la periferia de la pupila. Como un ejemplo, la Tabla 2 indica los parámetros para una de estas correcciones. En primer lugar, la óptica de un ojo se divide en dos secciones: la pupila central de 2,5 mm y la pupila exterior de aproximadamente 5 mm de diámetro. En segundo lugar, se inducirá una aberración esférica negativa de aproximadamente $-4 \mu\text{m}$ ($-0,3(Z_{12}(r) + 3,87 Z_4(r))$) en la pupila central, mientras que una aberración esférica positiva de aproximadamente $4 \mu\text{m}$ ($0,3(Z_{12}(r) + 3,87 Z_4(r))$) se controla en la sección de la pupila exterior. El desplazamiento focal para cada tamaño óptico es de -0.6 dioptrías y 1,1 dioptrías, respectivamente.

[0051] La FIG. 11a muestra la función de transferencia de modulación calculada de un ojo para un objeto lejano (0 D, arriba) y un objeto cercano (1,9 D, debajo), si el ojo tiene una corrección refractiva de acuerdo con los parámetros de la Tabla 2. Se consideran tres tamaños de pupila: pupila de 2 mm a la izquierda, pupila de 3,5 mm en el medio y pupila de 5 mm a la derecha. La abscisa de los diagramas de MTF es la frecuencia espacial en ciclos/grados. La FIG. 11b muestra las imágenes retinianas calculadas de los gráficos de agudeza en una retina de un ojo para un objeto lejano (0 D, arriba) y un objeto cercano (1,9 D, debajo). La FIG. 12 muestra la agudeza

estimada de un ojo con un elemento óptico para el tratamiento de la presbicia en 5 tamaños de pupila diferentes en una de las realizaciones indicadas en la Tabla 2.

[0052] Se observa que la agudeza estimada es de 20/30 o mejor para todos los tamaños de pupila de menos de 3,5 mm de diámetro, y para la visión de lejos cuando el tamaño de la pupila es grande (4 mm o 5 mm). Para un objeto cercano, la agudeza estimada es de 20/40 o mejor cuando el tamaño de la pupila es grande (4 mm o 5 mm).

[0053] En otro método para las correcciones de la presbicia, se induce una aberración esférica negativa significativa en el centro de la pupila, mientras que se elimina la aberración esférica para una pupila grande en un ojo individual.

Tabla 3 Parámetros de una corrección refractiva para la presbicia

	Pupila central	Periferia de la pupila
Diámetro exterior (mm)	2,8	6
Aberración esférica deseada p^4 (μm)	-4	0
Desplazamiento focal (D)	0	0

[0054] Como otro ejemplo, La Tabla 3 indica los parámetros para una de estas correcciones. En primer lugar, la óptica de un ojo se divide en dos secciones: la pupila central de 2,8 mm y la pupila exterior de aproximadamente 6 mm de diámetro. En segundo lugar, una aberración esférica negativa de aproximadamente $-4 \mu\text{m}$ ($-0,3 (Z_{12}(r) + 3,87 Z_4(r))$) será inducida en la pupila central, mientras que la aberración esférica en la periferia de la pupila ($> 2,8 \text{ mm}$) de un ojo se reduce o elimina en su mayoría. El desplazamiento focal es idéntico para el centro de la pupila y la periferia de la pupila.

[0055] La FIG. 13a muestra la función de transferencia de modulación calculada de un ojo para un objeto lejano (0 D, arriba) y un objeto cercano (1,9 D, debajo) si el ojo tiene una distribución refractiva de acuerdo con los parámetros de la Tabla 3. Se consideran tres tamaños de pupila: pupila de 2 mm a la izquierda, pupila de 4 mm en el medio y pupila de 6 mm a la derecha. La abscisa de MTF es la frecuencia espacial en ciclos/grados. La FIG. 13b muestra las imágenes retinianas calculadas de los gráficos de agudeza en una retina de un ojo para un objeto lejano (0 D, arriba) y un objeto cercano (1,9 D, debajo).

[0056] La FIG. 14 muestra la agudeza estimada de un ojo en un tratamiento de la presbicia a 6 tamaños de pupila diferentes de acuerdo con los parámetros de la Tabla 3. Debe observarse que la corrección refractiva puede proporcionar una excelente agudeza (20/30 o mejor) para la visión de lejos (aproximadamente 0 D) para el tamaño de la pupila mayor de 4 mm (por la noche), y para la visión de cerca (aproximadamente 1,8 D) para el tamaño de la pupila inferior a 4 mm. También se observa que la corrección refractiva puede proporcionar una agudeza aceptable (20/40 o mejor) para una profundidad de enfoque de 2 dioptrías para tamaños de pupilas iguales a o menores de 3,5 mm. Además, debe observarse que la corrección refractiva tiene las características de una corrección bifocal para el tamaño de la pupila mayor de 3,5 mm y hay una zona de baja agudeza entre 0,3 D y 1,2 D.

[0057] En otra realización más para las correcciones de la presbicia, se induce una aberración esférica positiva significativa en el centro de la pupila, mientras que se corrige la aberración esférica para una pupila grande de un ojo.

Tabla 4 Parámetros de una corrección refractiva para la presbicia

	Pupila central	Periferia de la pupila
Diámetro exterior (mm)	4	6
Aberración esférica deseada p^4 (μm)	13,4	0
Desplazamiento focal (D)	1,7	0

[0058] Como otro ejemplo, La Tabla 4 indica los parámetros para una de estas correcciones. En primer lugar, la óptica de un ojo se divide en dos secciones: la pupila central de 4 mm y el área anular exterior de la pupila. En segundo lugar, se inducirá una aberración esférica positiva de aproximadamente $13,4 \mu\text{m}$ ($1,0 (Z_{12}(r) + 3,87 Z_4(r))$) en la pupila central mientras se corrige la aberración esférica en la periferia de la pupila ($>4 \text{ mm}$) de un ojo. El desplazamiento focal para cada sección óptica es de 1,7 D dioptrías y 0 dioptrías, respectivamente.

[0059] La FIG. 15 muestra la función de transferencia de modulación calculada de un ojo para la visión de lejos (0 D, arriba) y para visión intermedia (1,0 D, medio) y visión cercana (1,8 D, debajo) si el ojo tiene una distribución refractiva de acuerdo con los parámetros de la Tabla 4. Se consideran tres tamaños de pupila: pupila de 2 mm a la

izquierda, pupila de 4 mm en el medio y pupila de 6 mm a la derecha. La abscisa de los diagramas de MTF es la frecuencia espacial en ciclos/grados.

[0060] Resulta obvio, a partir de los datos de MTF, que la corrección refractiva puede proporcionar una excelente visión de lejos por la noche y una visión de cerca degradada en grandes tamaños de pupila. La corrección refractiva puede proporcionar una visión aceptable (agudeza de 20/40 o mejor) para una profundidad de enfoque de 2 dioptrías para tamaños de pupila iguales a o menores de 4 mm, como se muestra en la FIG. 16.

[0061] Se muestran tres realizaciones para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central y el control de la aberración de alto orden en la periferia de la pupila. Debe señalarse que estas correcciones refractivas indicadas de la Tabla 2 a la Tabla 4 son las más apropiadas para los ojos con cierta acomodación residual (1 a 2 dioptrías). Además de los desplazamientos focales y la aberración esférica, la corrección refractiva puede incluir una corrección esfero cilíndrica convencional para la visión de lejos (esfera, cilindro y ángulo).

[0062] La figura 17a muestra un elemento óptico para una corrección de la presbicia que comprende dos secciones 171 y 172 dentro de las cuales se controla la aberración esférica (o incluso las aberraciones de alto orden). Más allá de la pupila de un ojo 173 para la visión fotópica, la sección exterior 173 puede o no contener aberración esférica. El diámetro de la sección central (D1) está entre 1,8 mm y 4 mm. El diámetro de la sección media (D2) está entre 4 mm y 6 mm. El diámetro de la sección exterior (D3) oscila entre 6 mm y 25 mm, dependiendo de una implementación individual que incluye gafas, lentes de contacto, lentes de contacto implantadas, cirugías refractivas con láser, e incluso lentes intraoculares.

[0063] La FIG. 17b muestra una realización de una lente de contacto de color para tratamientos de la presbicia. Comprende dos secciones 175 y 176 dentro de las cuales se controla la aberración esférica (o incluso las aberraciones de alto orden). Más allá de la sección media clara 176, el dispositivo tiene una máscara anular que bloquea o atenúa la luz en el ojo. El diámetro de la sección central (D1) está entre 1,8 mm y 3,5 mm. El diámetro exterior de la sección media (D2) está entre 3,5 mm y 5 mm de diámetro. El diámetro exterior de la sección exterior (D3) oscila entre 8 mm y 12 mm. El elemento óptico se puede hacer con un proceso convencional conocido en la técnica anterior. La sección anular opaca o parcialmente transparente se puede obtener al recubrir o teñir una porción de una sección de lente clara, y también se puede obtener intercalando una capa opaca en una lente transparente.

Aumento de la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberraciones de alto orden en la pupila central del ojo

[0064] Los métodos de la Tabla 2 a la Tabla 4 implican el control preciso de la aberración esférica en la periferia de la pupila, lo que podría ser difícil para algunos procedimientos o dispositivos. Un método mejorado sin alterar la aberración de alto orden en la periferia de la pupila sería ventajoso.

[0065] Describimos métodos para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo para tratamientos de la presbicia dividiendo una pupila de un ojo en una pluralidad de secciones y controlando la aberración esférica solo en la sección de la pupila central. Tal y como se muestra en la FIG. 18, la óptica de un ojo en condiciones fotópicas se divide en dos secciones 181 (centro de la pupila) y 182 (periferia de la pupila). Induiremos aberración esférica solo en la pupila central 182, pero no alteraremos la aberración esférica de un ojo en la periferia de la pupila. El diámetro del centro de la pupila 181 está entre 2 mm y 4 mm y el diámetro exterior de D2 está entre 4 mm y 6 mm. La pupila natural de un ojo en estado mesópico se muestra mediante 183.

[0066] La FIG. 19 muestra un proceso para aumentar la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica en la pupila central. En primer lugar, la aberración de onda a través de la pupila de un ojo 191 se mide con un aberrómetro de frente de onda. El aberrómetro de frente de onda informa no solo de una corrección esférico-cilíndrica convencional, sino también de aberraciones de alto orden, como la aberración esférica, coma, etc. Una refracción manifiesta de poder esfero-cilíndrico, así como una amplitud de acomodación de un ojo, también se mide subjetivamente. En segundo lugar, se determina una corrección esfero-cilíndrica 192 para un elemento de corrección, con la cual el ojo se hace emétrope para la visión de lejos. En tercer lugar, se determina una cantidad deseada de aberración esférica para la pupila central (menos de 4 mm). La aberración esférica inducida en la pupila 195 central del ojo se determina en función de la aberración esférica deseada y la aberración esférica 193 ya en un ojo individual. En quinto lugar, un desplazamiento focal en la periferia 196 de la pupila se determina en función de la aberración de alto orden (aberración esférica) en un ojo individual 194. Por último, las correcciones de presbicia guiadas por frente de onda 197 se pueden lograr para las correcciones de visión con láser, lentes de contacto, gafas, lentes de contacto implantadas y lentes intraoculares basadas en los tres conjuntos de parámetros refractivos. Incluyen una corrección esférico-cilíndrica convencional a través de toda la pupila de un ojo 192, magnitudes de aberración esférica en el centro de la pupila 195, y desplazamientos focales en el centro de la pupila y en la periferia 196 de la pupila.

Tabla 5 Parámetros de una corrección refractiva para la presbicia

	Pupila central	Periferia de la pupila
Diámetro exterior (mm)	2,8	6
Aberración esférica deseada p^4 (μm)	-4	-4 (de un ojo)
Desplazamiento focal (D) - Método # 1	0	0
Desplazamiento focal (D) - Método # 2	0	-0,6 (determinada de forma personalizada en función de la aberración de orden superior en un ojo)

[0067] En un método, la corrección refractiva induce aberración esférica negativa en la sección central de la pupila pero sin cambiar la aberración de alto orden en la periferia de la pupila. Si un ojo tiene aberración esférica en la periferia de la pupila, la calidad óptica del ojo en el tamaño de la pupila más grande que la pupila central estará determinada por la aberración esférica en el ojo.

[0068] Como un ejemplo, la Tabla 5 indica un ojo hipotético con aberración esférica conocida de -4 mm para una pupila de 6 mm ($-0,3 (Z_{12}(r) + 3,87 Z_4(r))$). La corrección refractiva se realiza para inducir una aberración esférica negativa de -4 mm ($-0,3 (Z_{12}(r) + 3,87 Z_4(r))$) en la pupila central de 2,8 mm, mientras que la aberración de alto orden en la periferia de la pupila está determinada por las aberraciones de alto orden en el ojo.

[0069] Debido a la aberración esférica en el ojo en la periferia de la pupila, la calidad óptica del ojo en el tamaño de la pupila más grande que la pupila central de 2,8 mm será diferente de la corrección refractiva indicada en la Tabla 3.

[0070] La FIG. 20a muestra las MTF calculadas de un ojo bajo una corrección refractiva que induce una aberración esférica negativa significativa en la pupila central en una realización que tiene un desplazamiento focal (201 y 203) y no tiene un desplazamiento focal (202 y 204) entre el centro de la pupila y la periferia de la pupila. Se sabe que el ojo tiene una aberración esférica negativa de 4 μm para una pupila de 6 mm. Se consideran tres tamaños de pupila: pupila de 2 mm a la izquierda, pupila de 4 mm en el medio y pupila de 6 mm a la derecha. Solo se muestran las MTF para la visión de lejos. La abscisa de los diagramas de MTF es la frecuencia espacial en ciclos/grados.

[0071] La FIG. 20b muestra imágenes retinianas de gráficos de agudeza en un ojo bajo una corrección refractiva que induce una aberración esférica negativa significativa en la pupila central. Excepto por la aberración esférica inducida en la pupila central, el elemento óptico tiene la misma corrección esfero-cilíndrica a través de toda la pupila del ojo. Se consideran tres tamaños de pupila: pupila de 2 mm a la izquierda, pupila de 4 mm en el medio y pupila de 6 mm a la derecha. Según lo predicho por las MTF inferiores 202 y 204 en la Figura 20a, las imágenes retinianas de los gráficos de agudeza en una pupila de 4 mm (medio) y en una pupila de 6 mm (izquierda) están muy difuminadas.

[0072] La FIG. 20c muestra imágenes retinianas de gráficos de agudeza en un ojo bajo una corrección refractiva que induce una aberración esférica significativa en la pupila central en la otra realización. Además de la aberración esférica inducida en la pupila central y una corrección esfero-cilíndrica a lo largo de toda la pupila, el elemento óptico tiene un desplazamiento focal en la periferia de la pupila que se determina de forma personalizada en función de las aberraciones de alto orden en un ojo.

Tabla 6 Parámetros de una corrección refractiva para la presbicia

	Pupila central	Periferia de la pupila
Diámetro exterior (mm)	4	6
Aberración esférica deseada p^4 (μm)	13,4	-4 (De un ojo)
Desplazamiento focal (D) - método #1	2	0 (Fijo)
Desplazamiento focal (D) - método #2	2	-1,25 (determinada de forma personalizada en función de aberraciones de orden superior en un ojo).

[0073] Es evidente que las MTF 201 y 203 mejoradas en la FIG. 20a llevan a imágenes retinianas mejoradas para una pupila de 4 mm (medio) y para una pupila de 6 mm (derecha), y se requiere un desplazamiento focal en la periferia de la pupila para lograr una calidad de imagen aceptable para pupilas medianas y grandes.

[0074] Como otro ejemplo, la Tabla 6 indica un ojo hipotético con una aberración esférica conocida de -4 mm para una pupila de 6 mm ($-0,3 (Z_{12}(r) + 3,87 Z_4(r))$). También asumimos que la corrección refractiva solo induce una aberración esférica positiva de 13,4 mm ($1,0 (Z_{12}(r) + 3,87 Z_4(r))$) en la pupila central de 4 mm, mientras que la aberración de alto orden en la periferia de la pupila está determinada por las aberraciones de alto orden en un ojo.

[0075] Debido a la aberración esférica en la periferia de la pupila, la calidad óptica de un ojo en el tamaño de la pupila más grande que la pupila central (4 mm) será diferente de la corrección refractiva indicada en la Tabla 4.

[0076] La FIG. 21a muestra las MTF de un ojo para la visión de lejos (0 D) bajo una corrección refractiva que induce una aberración esférica positiva significativa en la pupila central en dos realizaciones, que difieren en el desplazamiento focal en la periferia de la pupila (véase la Tabla 6). Se sabe que el ojo tiene una aberración esférica negativa de 4 μm para una pupila de 6 mm. Se consideran tres tamaños de pupila: pupila de 2 mm a la izquierda, pupila de 4 mm en el medio y pupila de 6 mm a la derecha. La abscisa de los diagramas de MTF es la frecuencia espacial en ciclos/grados. Para pupilas de tamaños inferiores a 4 mm, la calidad óptica del ojo es idéntica para ambas realizaciones, tal y como se esperaba. Sin embargo, la calidad óptica de un ojo que tiene una corrección refractiva con un desplazamiento focal personalizado en función de aberraciones de alto orden en un ojo individual 211 es significativamente mejor que la de con un desplazamiento focal fijo de 0 D.

[0077] La FIG. 21b muestra imágenes retinianas de gráficos de agudeza en un ojo bajo una corrección refractiva que induce una aberración esférica positiva significativa en la pupila central. El desplazamiento focal en la periferia de la pupila es cero, con independencia de las aberraciones de alto orden en un ojo individual. Se consideran tres tamaños de pupila: pupila de 2 mm a la izquierda, pupila de 4 mm en el medio y pupila de 6 mm a la derecha. La FIG. 21c muestra imágenes retinianas de gráficos de agudeza en un ojo bajo una corrección refractiva que induce una aberración esférica positiva significativa en la pupila central. Un desplazamiento focal en la periferia de la pupila se determina en función de las aberraciones de alto orden en un ojo individual. Se consideran tres tamaños de pupila: pupila de 2 mm a la izquierda, pupila de 4 mm en el medio y pupila de 6 mm a la derecha. Resulta evidente que un desplazamiento focal que depende de la aberración de alto orden de un ojo individual en la periferia de la pupila puede mejorar significativamente la calidad de la imagen retiniana de una pupila grande por la noche.

[0078] Debe señalarse que las correcciones refractivas indicadas de la Tabla 5 a la Tabla 6 son las más apropiadas para el ojo con cierta acomodación residual (1 a 2 dioptrías). Además de el desplazamiento focal y la aberración esférica, la corrección refractiva puede incluir una corrección esfero-cilíndrica convencional para la visión de lejos (esfera, cilindro y ángulo).

[0079] La FIG. 22 muestra un elemento óptico para correcciones de la presbicia que comprende una sección central 221 dentro de la cual se induce una aberración esférica para un ojo en la pupila central, una sección exterior 222 dentro de la cual se altera poca o ninguna aberración esférica (o aberraciones de alto orden). El diámetro de la sección central (D1) está entre 1,8 mm y 4 mm. El diámetro de la sección exterior (D2) es de 6 mm a 25 mm, dependiendo de las implementaciones individuales que pueden incluir gafas, lentes de contacto, lentes de contacto implantadas, cirugías refractivas con láser, e incluso lentes intraoculares. El tamaño de la pupila de un ojo en una condición fotópica baja se muestra mediante 222.

Aumento de la profundidad de enfoque de un ojo mediante inducción de aberración esférica positiva a lo largo de la pupila de un ojo

[0080] El aumento de la profundidad de enfoque de un ojo también se puede lograr mediante inducción de aberración esférica positiva en la pupila del ojo y además un desplazamiento focal para establecer la mejor calidad de imagen con visión de lejos para un ojo. Tal y como se muestra en la FIG. 23, la óptica de un ojo bajo condiciones fotópicas se muestra como 231 con la pupila 232 del ojo para una condición de visión mesópica (visión fotópica con poca luz). El diámetro de la pupila (D1) está entre 3 mm y 6 mm que diferirá de un ojo a otro.

Tabla 7 aberración esférica positiva inducida a través de la pupila de un ojo en condiciones mesópicas

	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
aberración esférica ρ^4 (μm)	4,2	13,4	32,7	67,8

[0081] La Tabla 7 muestra la cantidad total de aberración esférica positiva inducida en ojos dentro de diferentes tamaños de pupila. Un desplazamiento focal (por ejemplo, de aproximadamente 1,7 D) puede añadirse a una corrección esfero-cilíndrica convencional para establecer la mejor calidad de imagen del ojo para la visión de lejos de un ojo.

[0082] La FIG. 24 muestra las MTF de un ojo para tres tamaños de pupila: 2 mm a la izquierda, 4 mm en el medio y 6 mm a la derecha. Se consideran tres distancias de visualización diferentes: 0 D (fila superior), 1,0 D (fila del medio) y 1,75 D (fila inferior). Debido a la gran aberración esférica positiva inducida por la corrección refractiva, podrían ignorarse las aberraciones de alto orden en un ojo humano normal. La abscisa de los diagramas de MTF es la frecuencia espacial en ciclos/grados.

[0083] La FIG. 25 muestra la agudeza estimada de un ojo con un elemento óptico para el tratamiento de la presbicia indicado en la Tabla 7 para 7 tamaños de pupila diferentes. La corrección refractiva puede proporcionar una visión aceptable (agudeza de 20/40 o mejor) para una profundidad de enfoque de 2 dioptrías para tamaños de

pupila iguales a o menores de 6 mm de diámetro. Se puede lograr una agudeza visual excelente (20/30) para la visión de lejos para un tamaño de la pupila inferior a 4,5 mm.

- 5 **[0084]** La FIG. 26 muestra un elemento óptico para una corrección de la presbicia que comprende una sección óptica central 261 que cubre la pupila de un ojo 263 bajo condiciones fotópicas. El diámetro de la sección central 261 está entre 3 mm y 6 mm dependiendo del tamaño de la pupila de un ojo individual. Se inducirá una aberración esférica positiva significativa a lo largo de una pupila 263 de un ojo a visión mesópica (visión fotópica con poca luz). La sección exterior más allá de la pupila del ojo 262 puede o no contener aberración esférica. El diámetro de la sección media (D2) es de 6 mm a 25 mm dependiendo de las implementaciones individuales, incluyendo gafas,
- 10 lentes de contacto, lentes de contacto implantadas, cirugías refractivas con láser, e incluso lentes intraoculares.

REIVINDICACIONES

1. Una lente oftálmica multifocal para un ojo, estando configurada la lente como una lente implantable o lente que puede llevarse puesta y comprendiendo:

un poder dióptrico de referencia que se extiende a través de la lente para una corrección esférico-cilíndrica convencional para corregir un defecto de la visión de lejos; en donde una sección central (221; 261) de la lente induce aberración esférica, **caracterizada por que** en la sección central, al menos una superficie de la lente es asférica y tiene una aberración esférica expresada por una potencia cuádruple del radio polar, y **por que** la sección central tiene un diámetro entre 1,8 mm y 4,0 mm.

2. La lente según la reivindicación 1, en donde la aberración esférica se expresa mediante la expresión:

$$\phi(r) = c1 * (r/r_0)^4$$

en donde el coeficiente c1 mide la cantidad de aberración esférica.

3. La lente según la reivindicación 1, en donde la sección central (221; 261) de la lente incluye un desplazamiento focal opcional además de la corrección esfero-cilíndrica convencional y la aberración esférica inducida.

4. La lente según la reivindicación 3, que produce una distribución de frente de onda para tratamientos de la presbicia como

$$\phi(r) = c1 * (r/r_0)^4 + c2 * (r/r_0)^2$$

donde c2 mide el desplazamiento focal.

5. La lente según la reivindicación 1 o 3, en donde la lente tiene un diámetro de entre 6 mm a 25 mm.

6. La lente según la reivindicación 1 o 3, en donde la aberración esférica en la sección central está representada por más de un término polinomial.

7. La lente según la reivindicación 1 o 3, en donde la aberración esférica en la sección central de la lente tiene un error de frente de onda de pico con respecto al valle de más de 1 micrómetro.

8. La lente según la reivindicación 1 o 3, en donde la lente está configurada además para reducir aberraciones de Zernike de alto orden en el ojo, incluida la aberración esférica en una periferia (92; 172) de la pupila.

9. La lente según la reivindicación 1 o 3, en donde la aberración esférica en la sección central de la lente incluye una aberración esférica positiva en una primera zona (81) y una aberración esférica negativa en una segunda zona (82).

10. La lente según la reivindicación 1 o 3, que tiene además propiedades correctivas refractivas, que comprende:

una pluralidad de secciones ópticas (171, 172);

en donde al menos dos de la pluralidad de secciones ópticas tienen un poder de enfoque y una aberración esférica diferentes;

en donde la aberración esférica está representada por un término polinomial.

11. La lente según la reivindicación 10, en donde las al menos dos secciones ópticas están dispuestas concéntricamente para formar una sección óptica interior y una sección óptica exterior.

12. La lente según la reivindicación 11, en donde la aberración esférica de la sección óptica interior está configurada para aumentar la profundidad de enfoque cuando el ojo tiene un tamaño de pupila natural igual a o menor de 4,0 mm de diámetro.

13. La lente según la reivindicación 11, en donde la aberración esférica de la sección óptica interior tiene un error de frente de onda de pico con respecto al valle de más de 1 micrómetro.

14. La lente según la reivindicación 11, en donde la aberración esférica en la sección óptica exterior está configurada para reducir la aberración esférica que existe naturalmente en un ojo.

15. La lente según la reivindicación 11, en donde la aberración esférica de la sección óptica interior está representada por más de un término polinomial.

16. La lente según la reivindicación 1, que comprende además una máscara anular (35, 83) que bloquea o atenúa la luz.

17. La lente según la reivindicación 16, en donde la sección óptica central se divide además en dos secciones ópticas concéntricas (81, 82) que tienen aberraciones esféricas de signos opuestos.

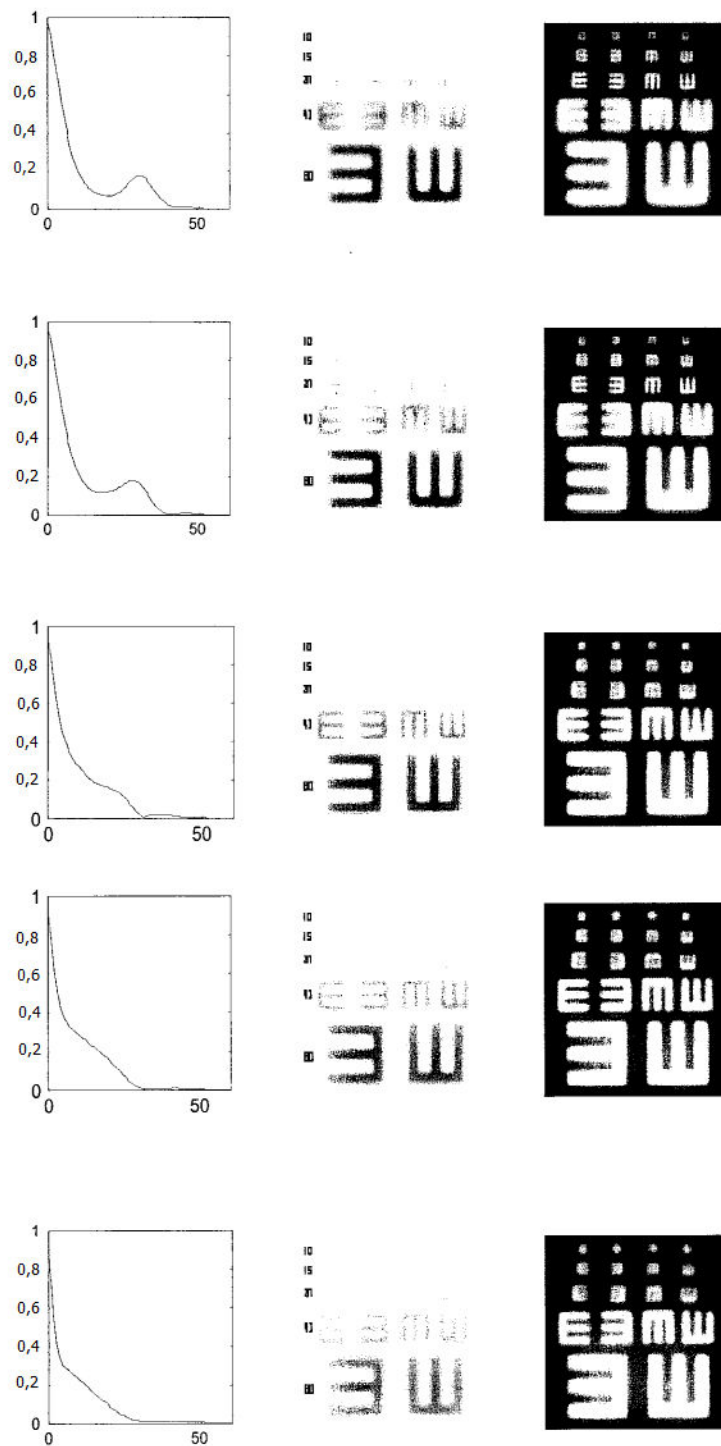


FIG 1

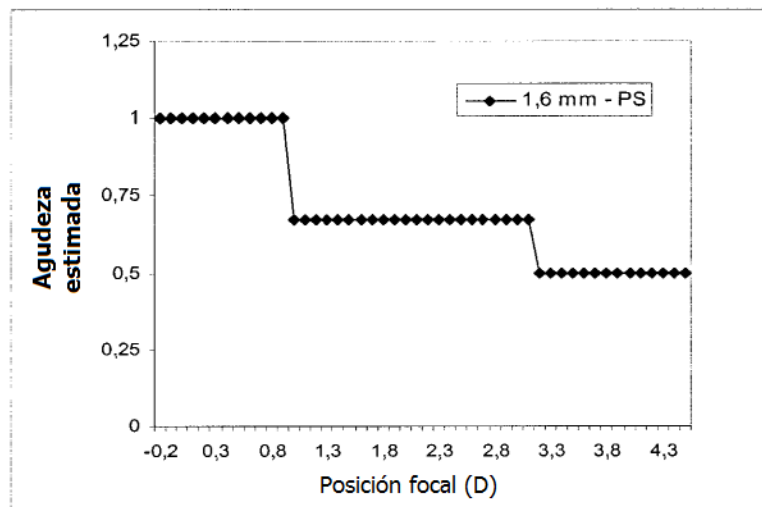


FIG 2a

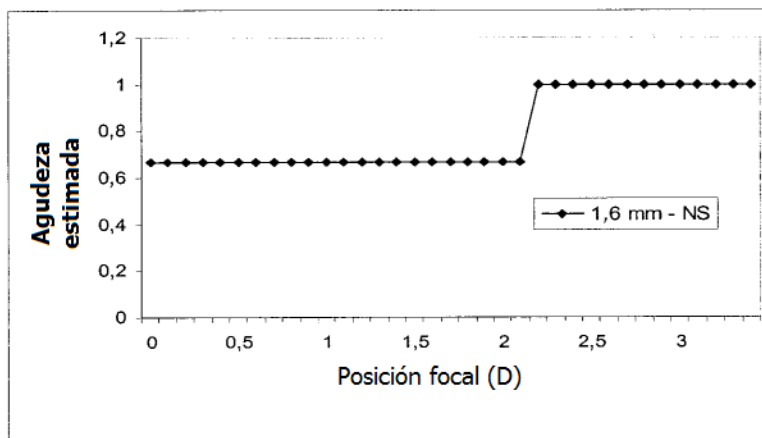


FIG 2b

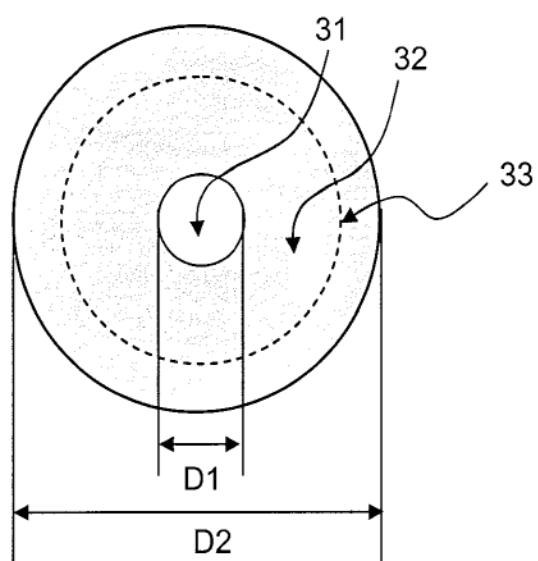


FIG 3a

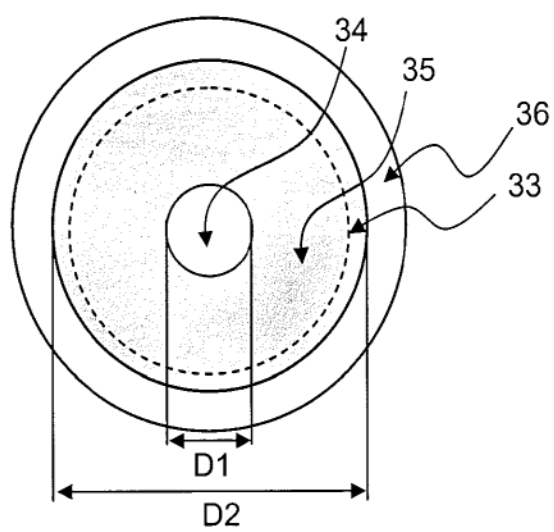


FIG 3b

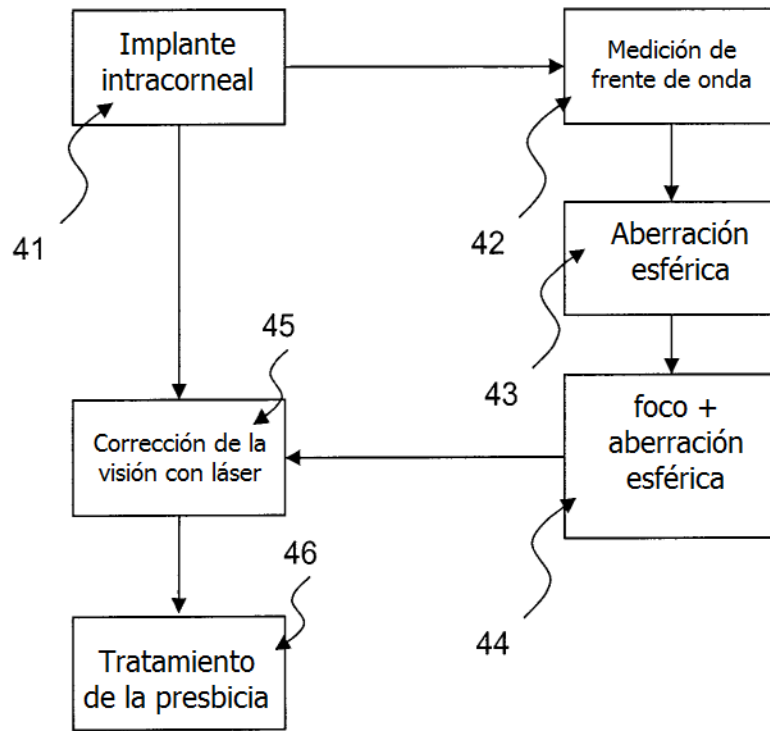


FIG 4

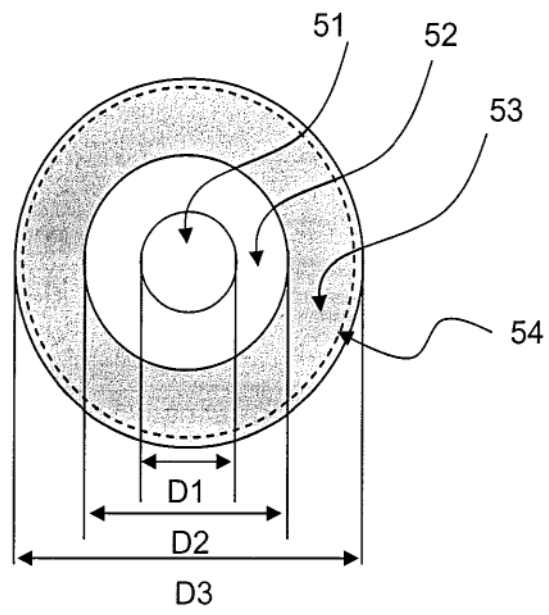


FIG 5

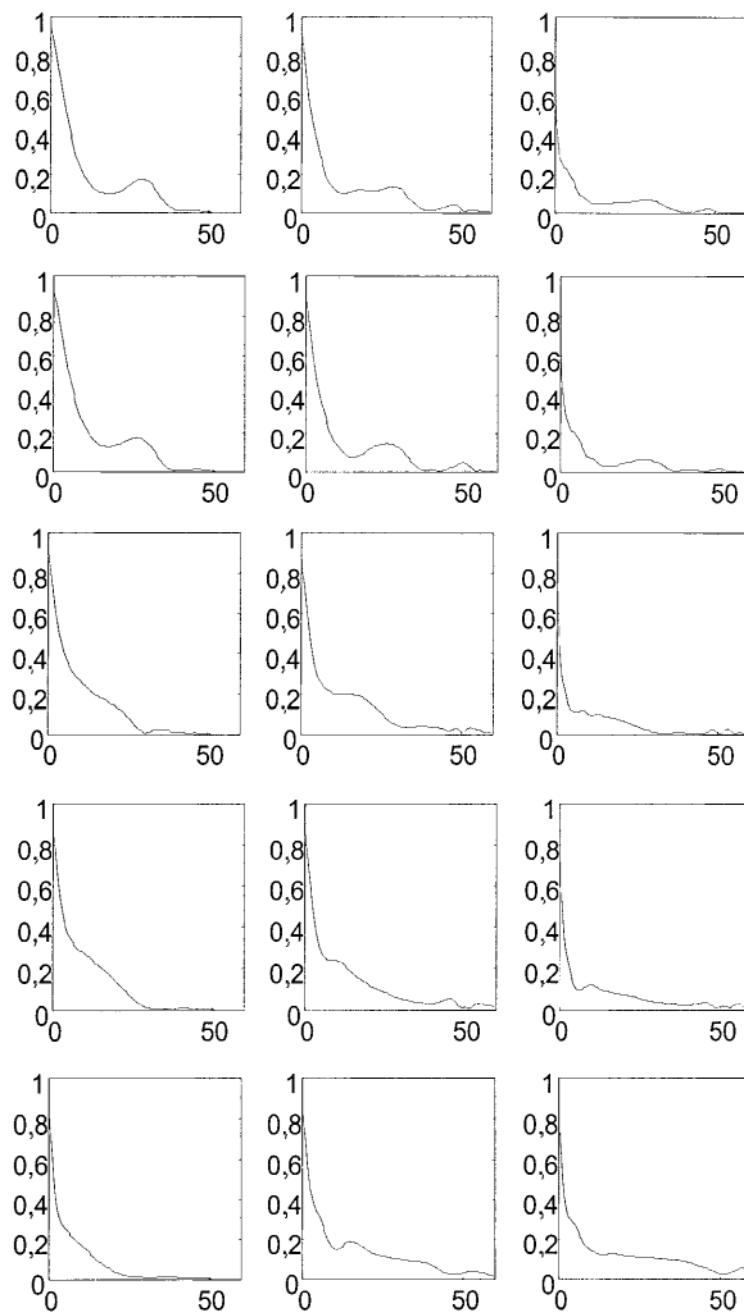


FIG 6

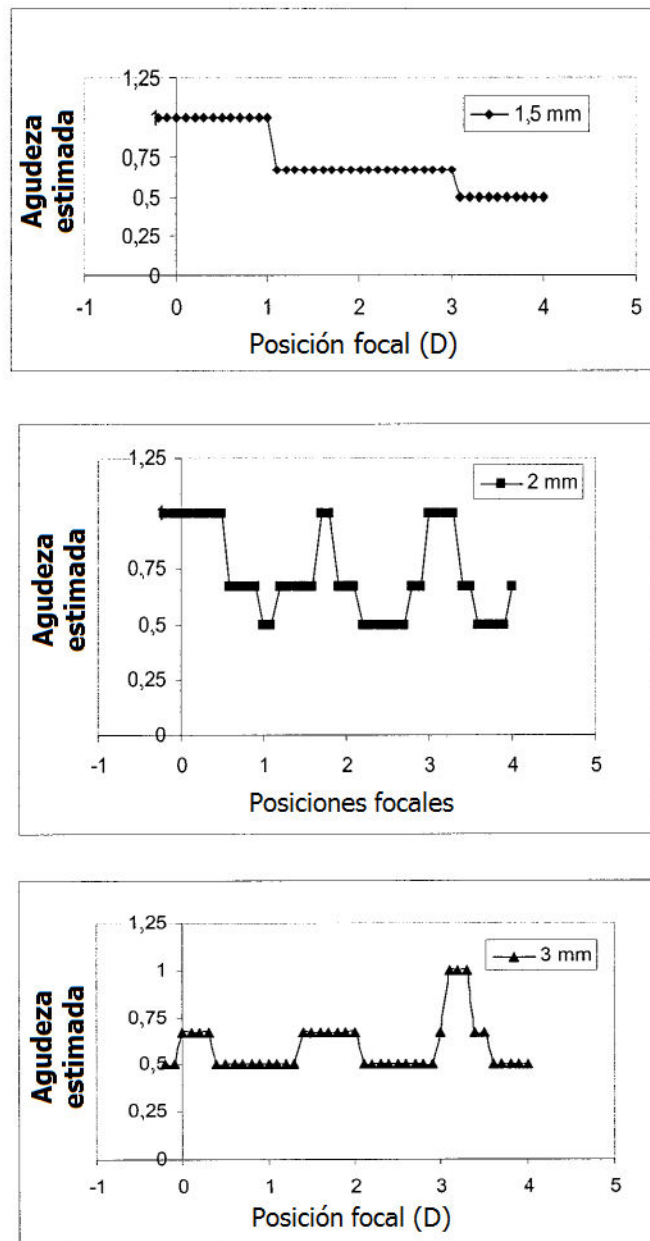


FIG 7

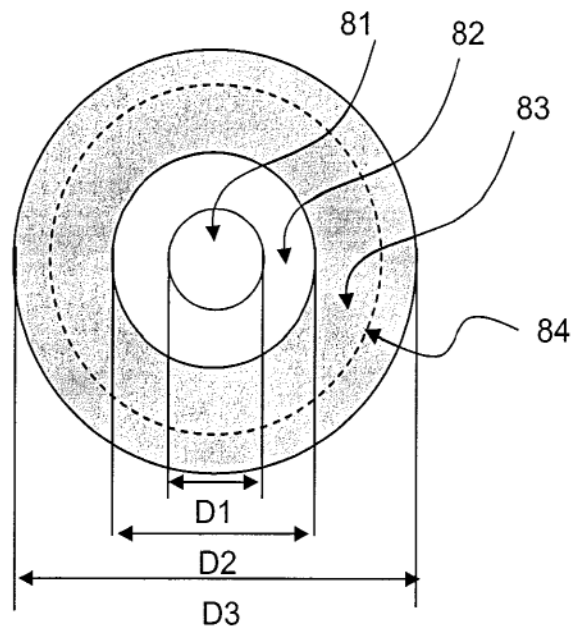


FIG8a

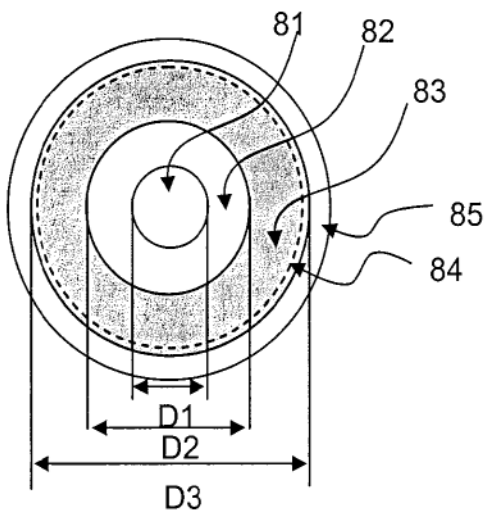


FIG8b

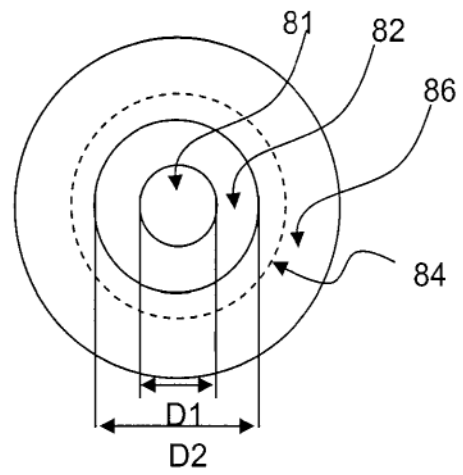


FIG8c

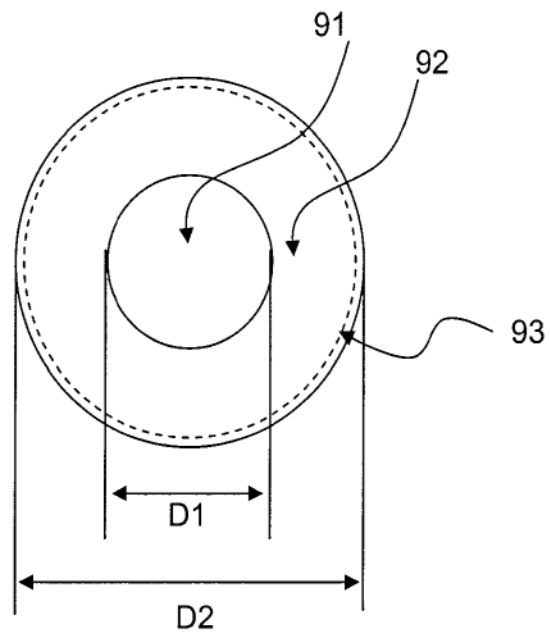


FIG 9

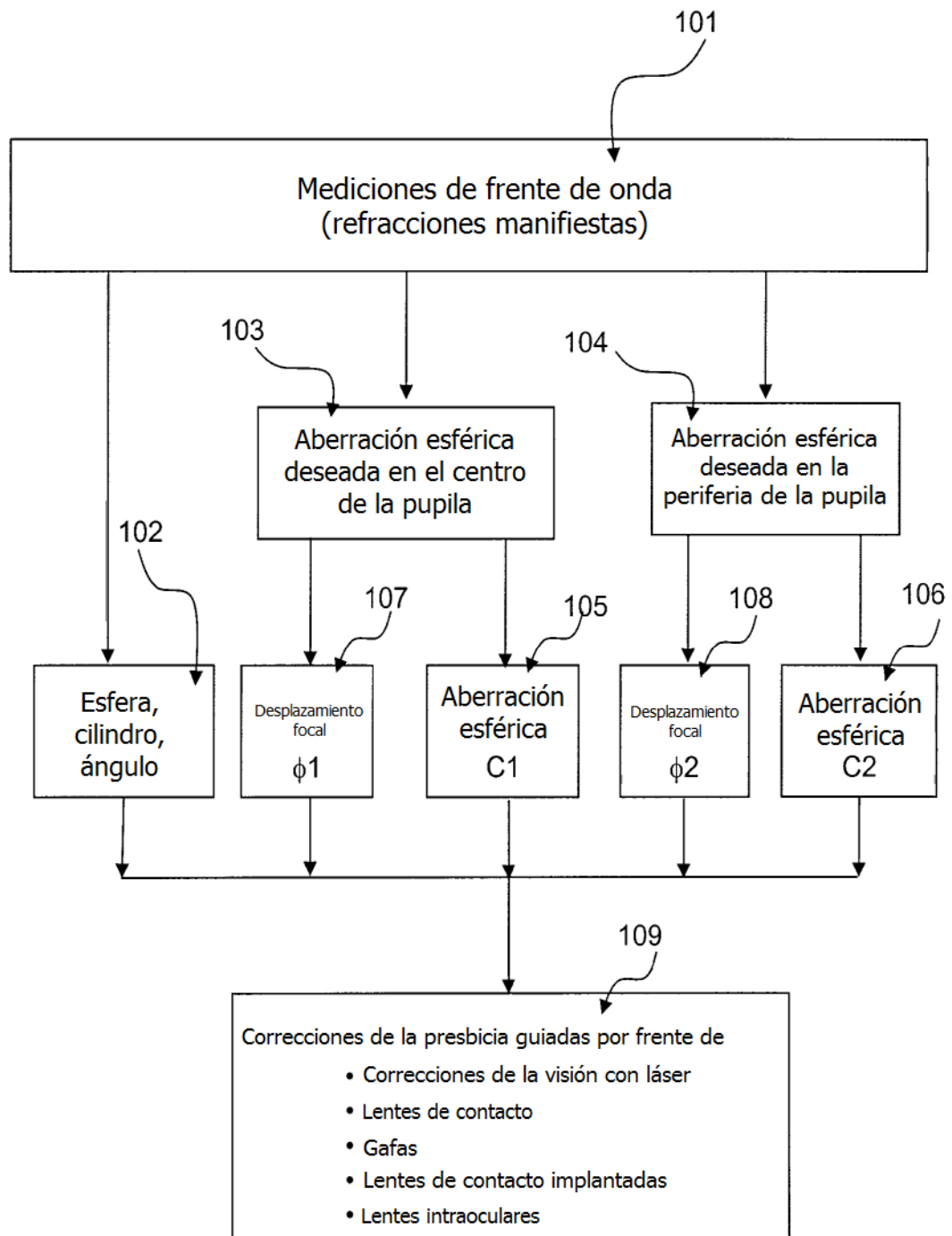


FIG 10

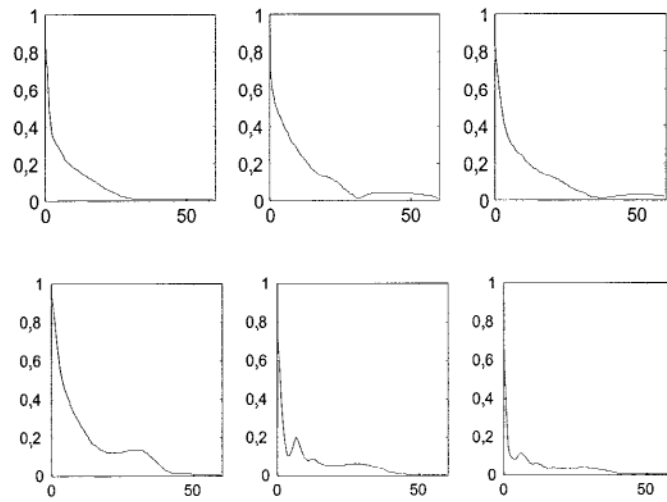


FIG11 a

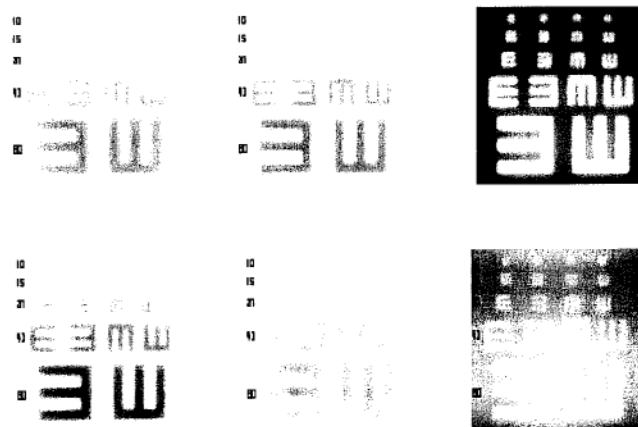


FIG 11b

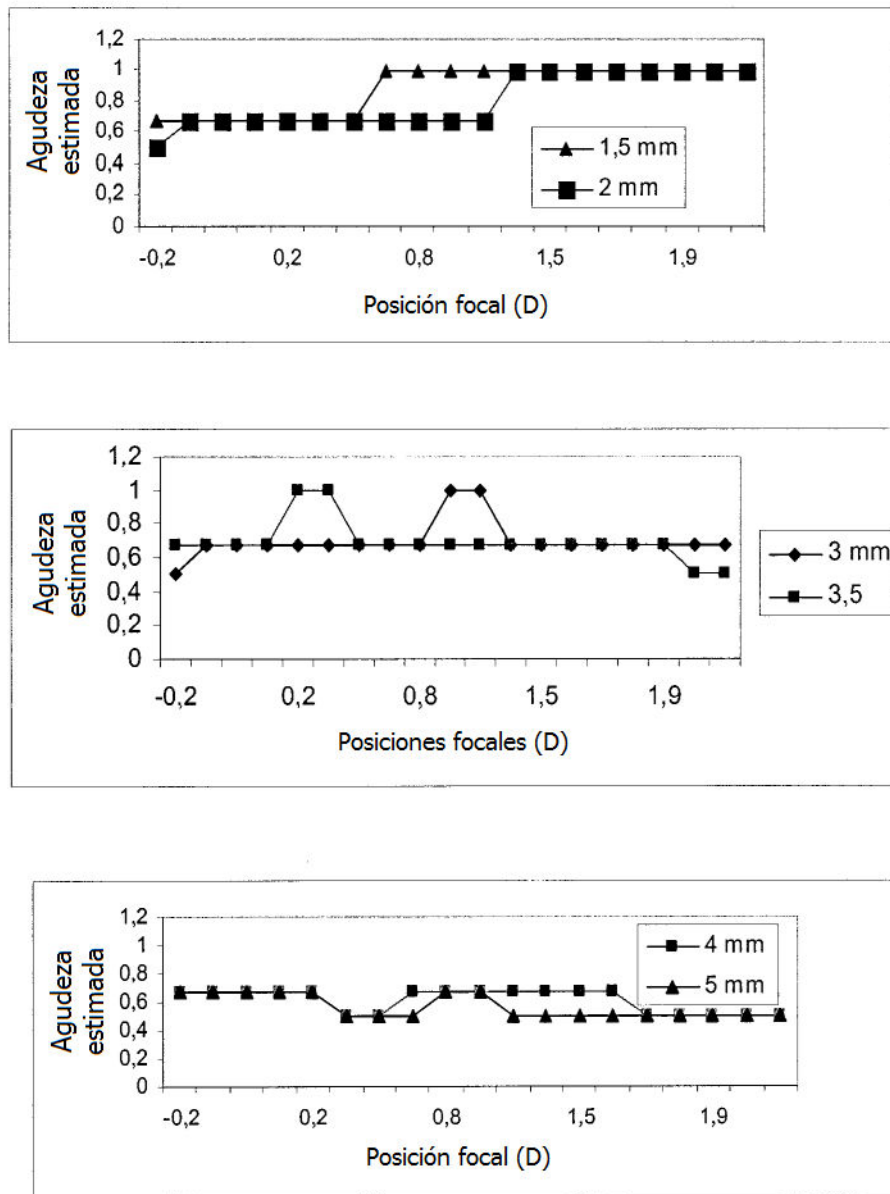


FIG 12

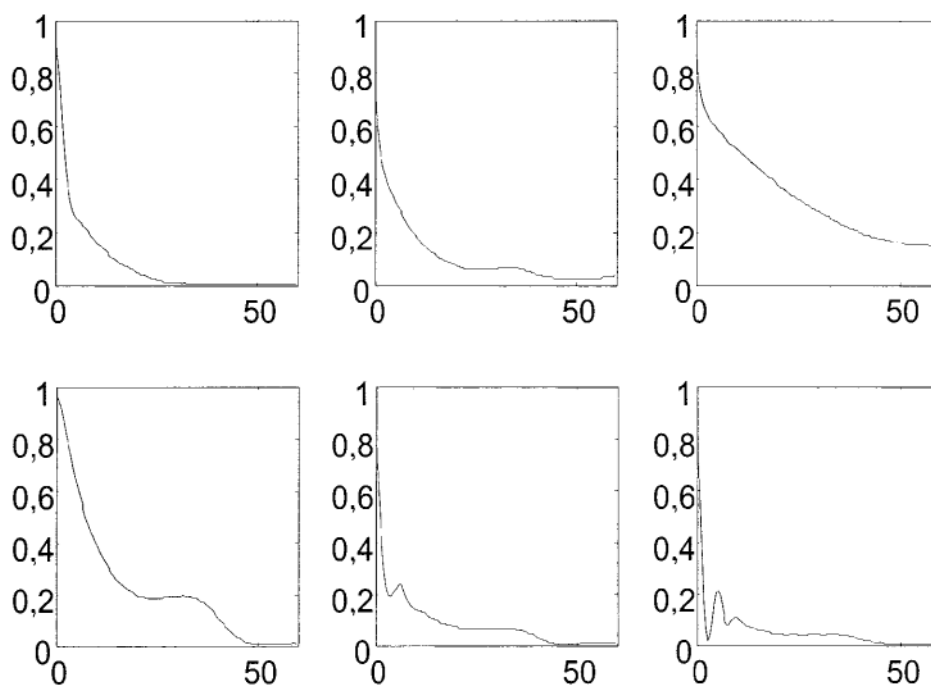


FIG13 a

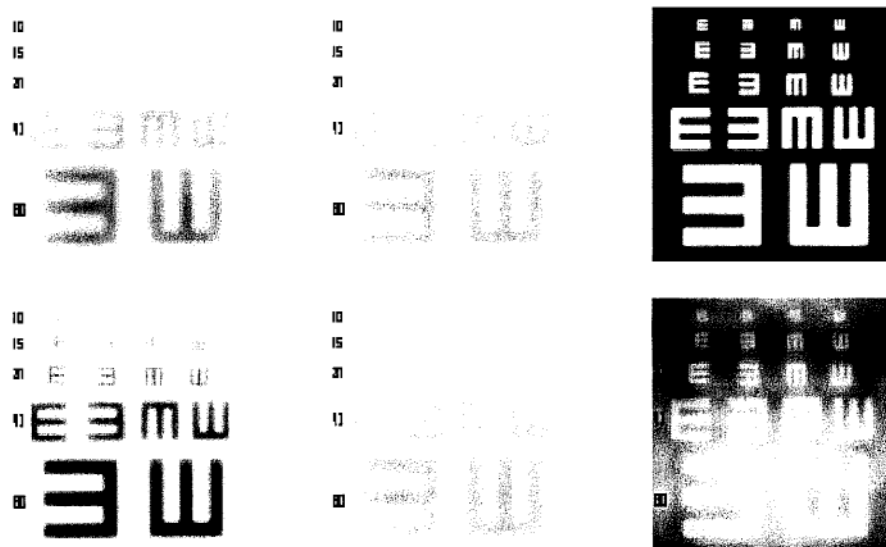


FIG 13b

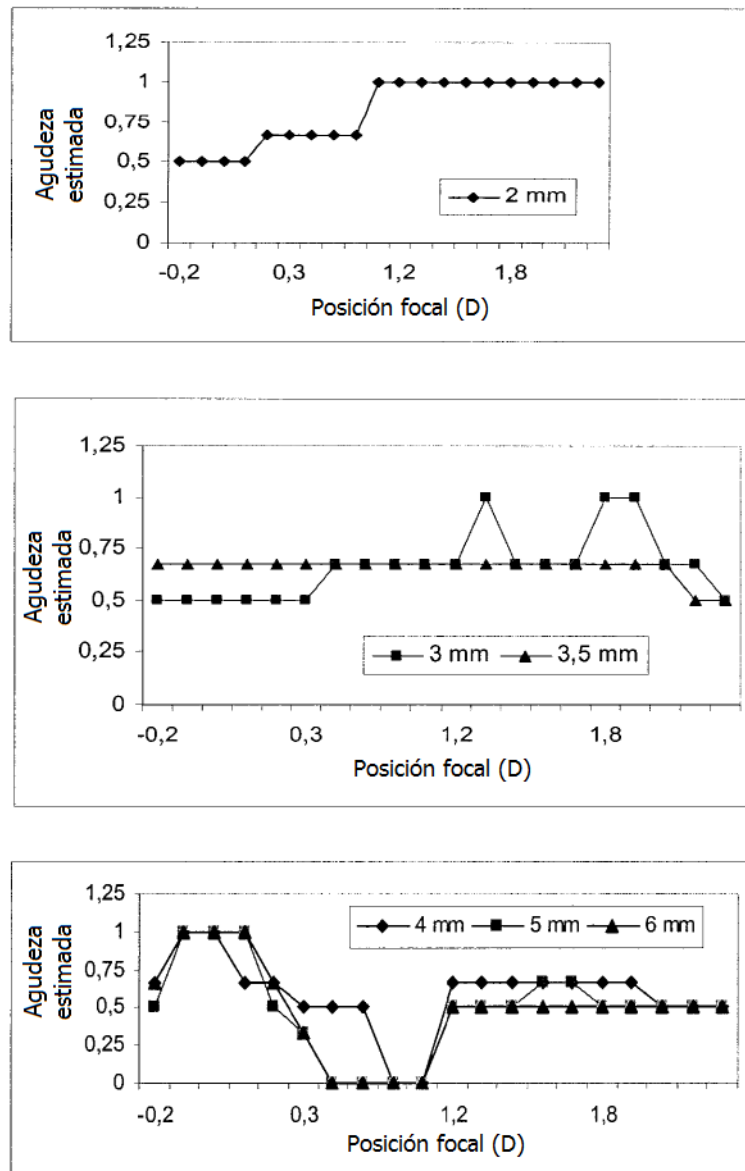


FIG 14

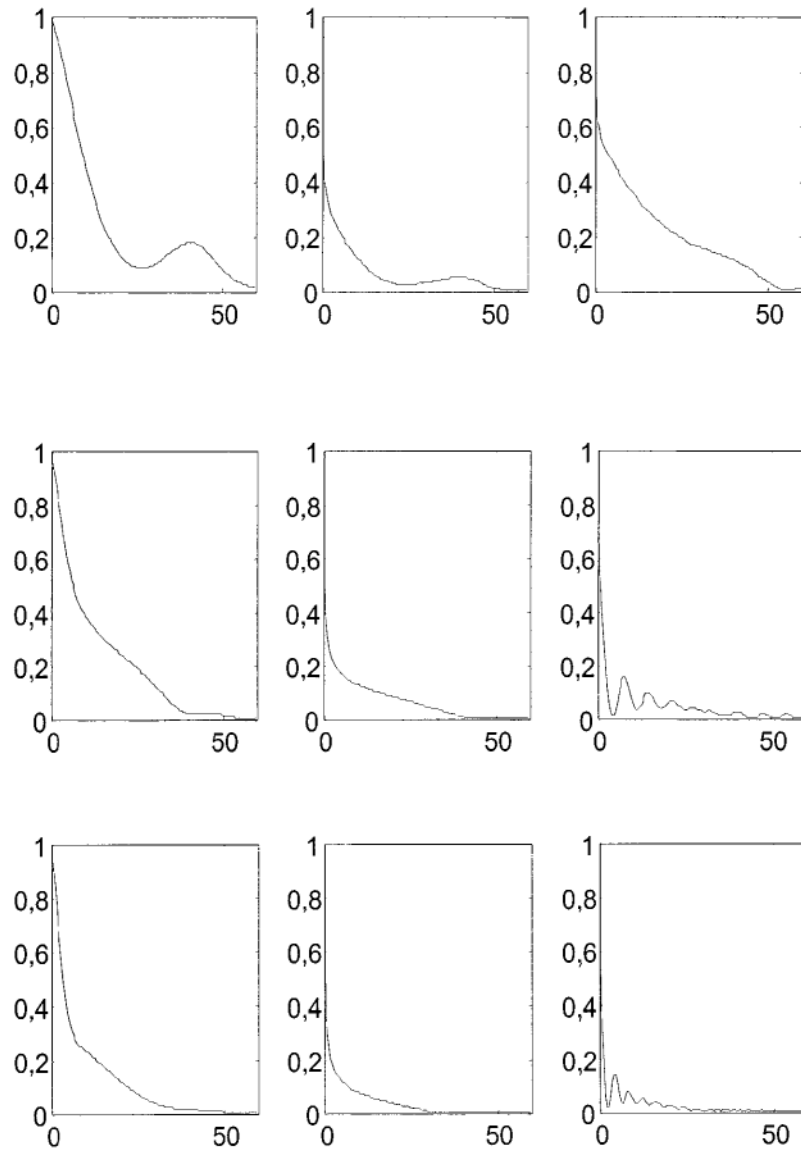


FIG 15

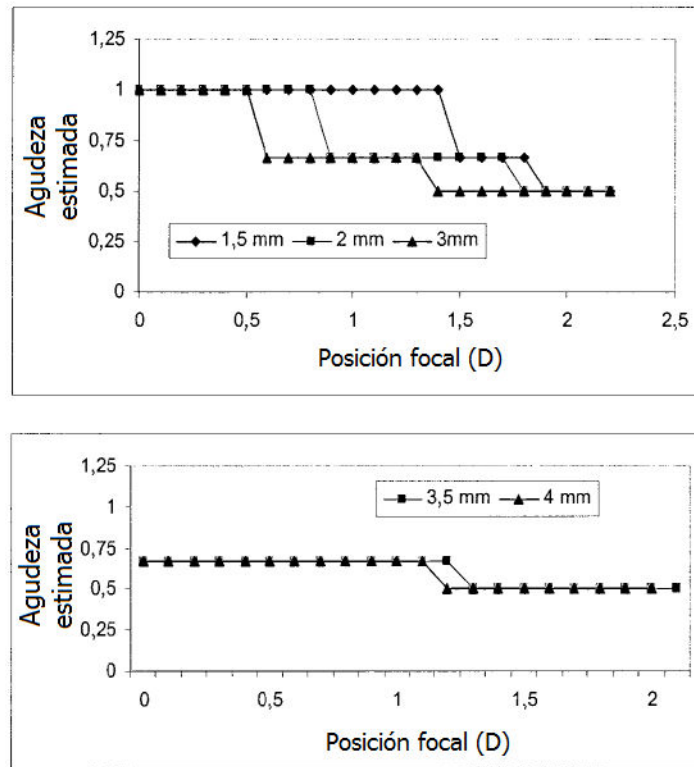


FIG 16

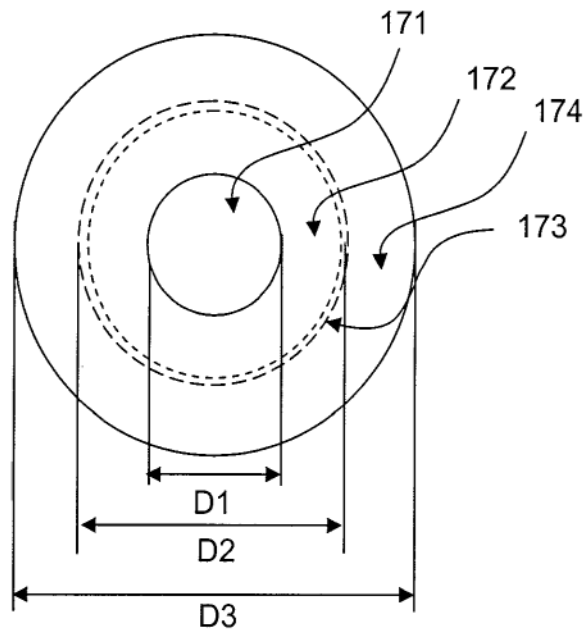


FIG 17a

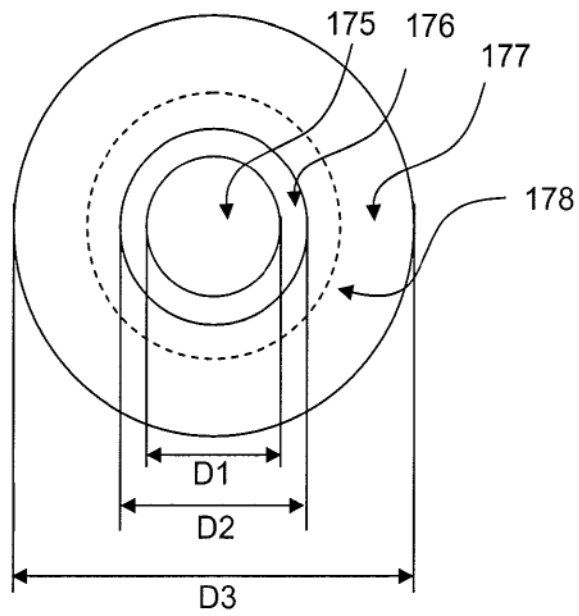


FIG 17b

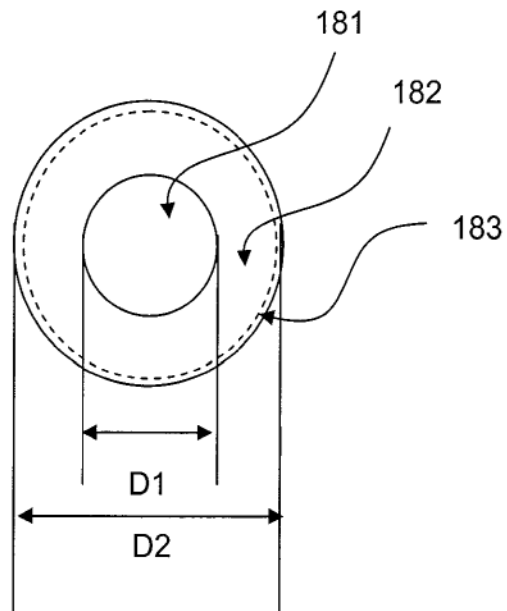


FIG 18

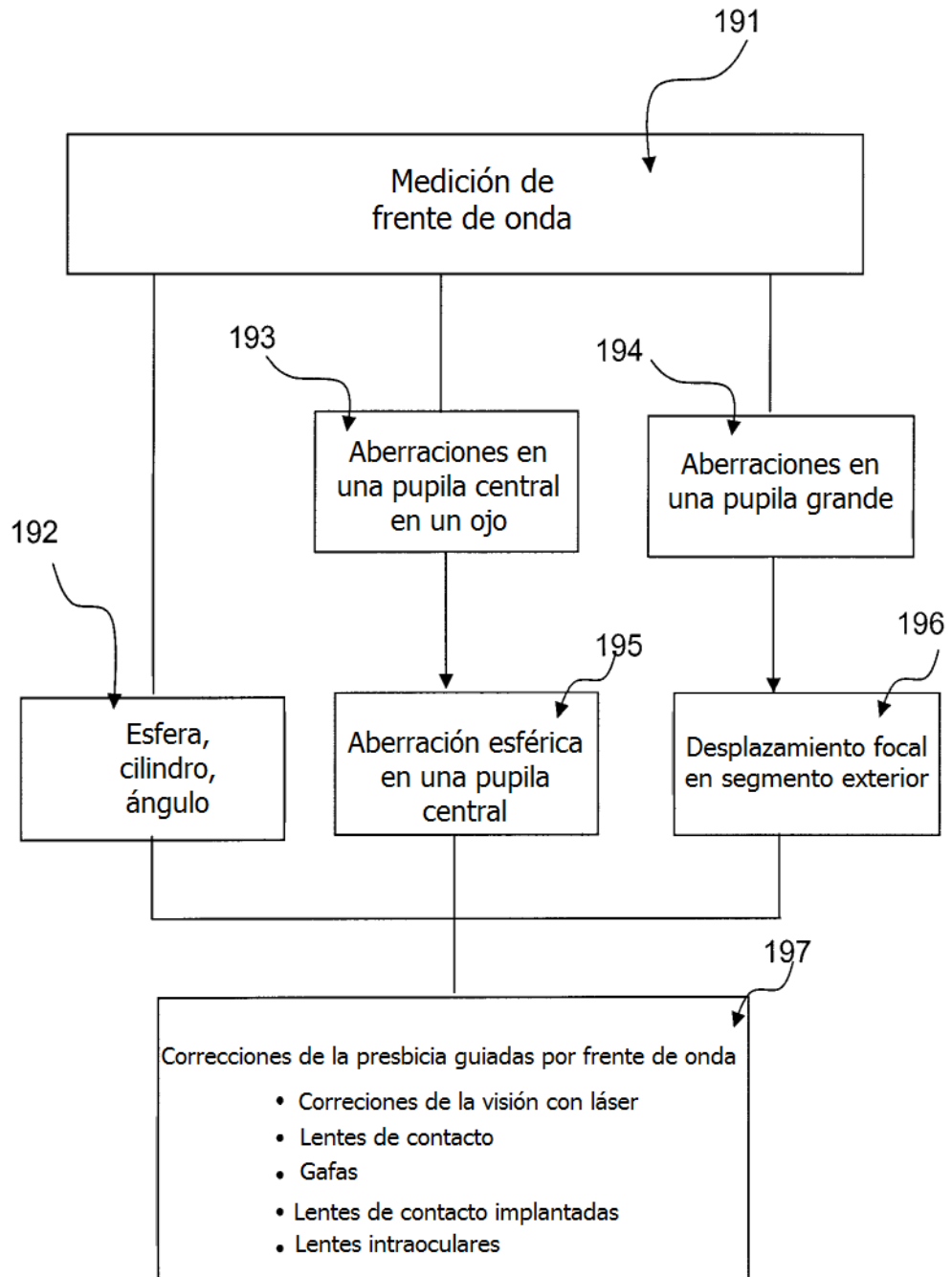


FIG 19

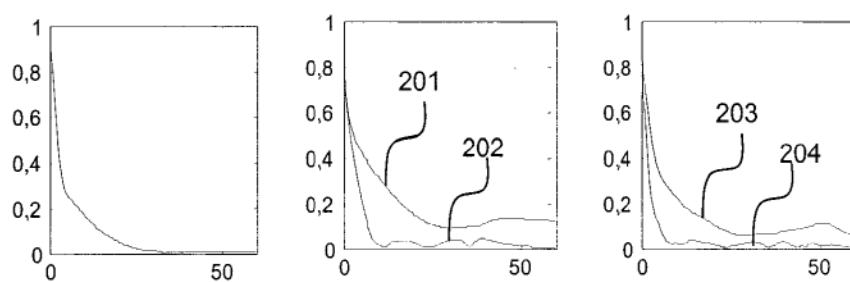


FIG 20a

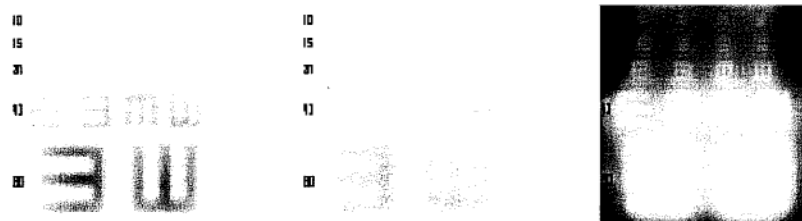


FIG 20b



FIG 20c

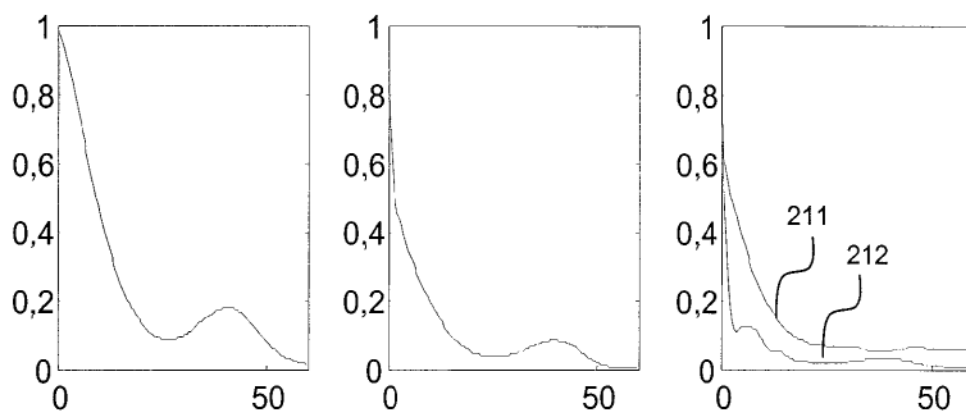


FIG 21a

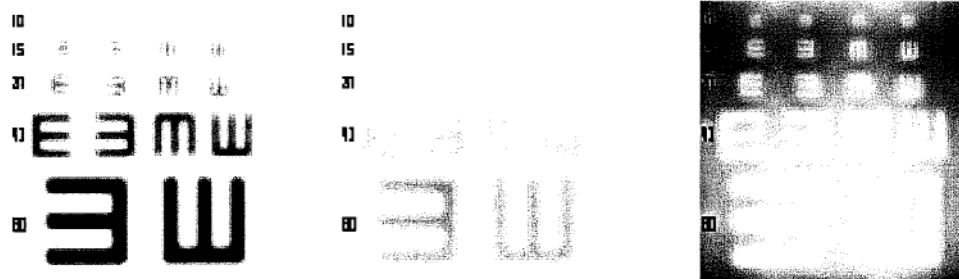


FIG 21b

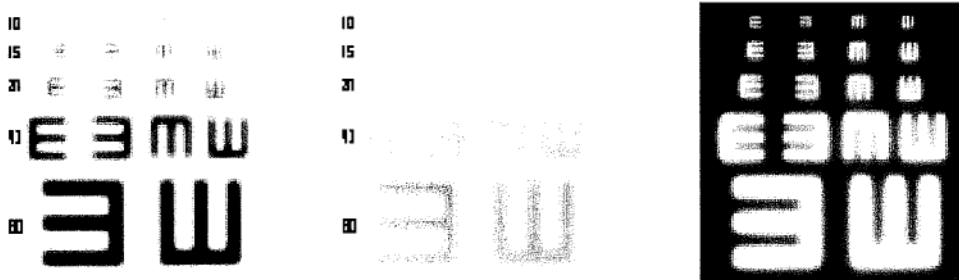


FIG 21c

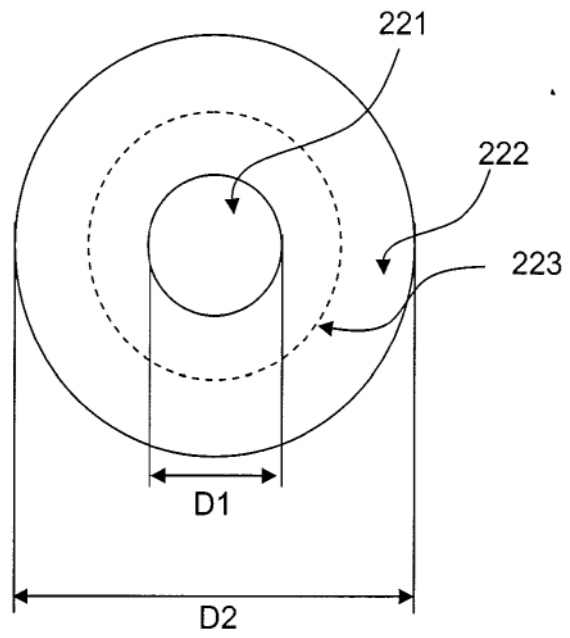


FIG 22

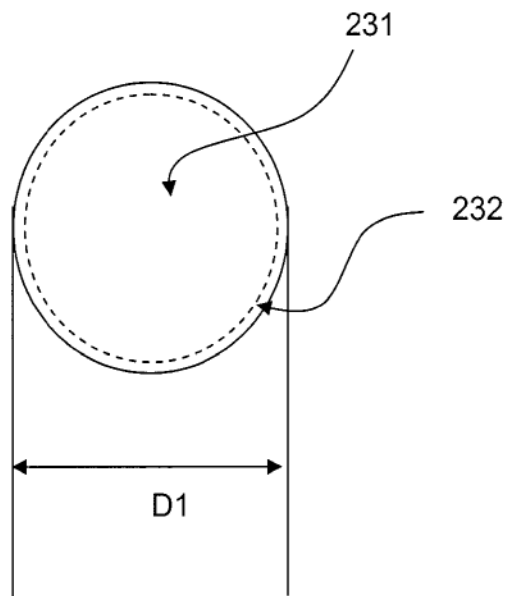


FIG 23

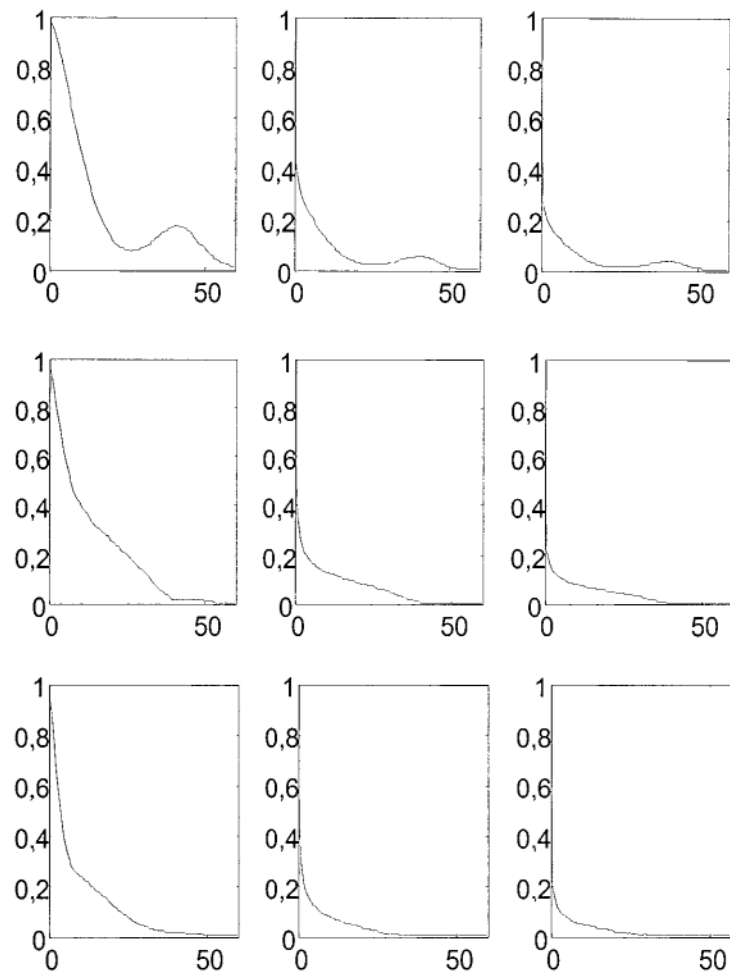


FIG 24

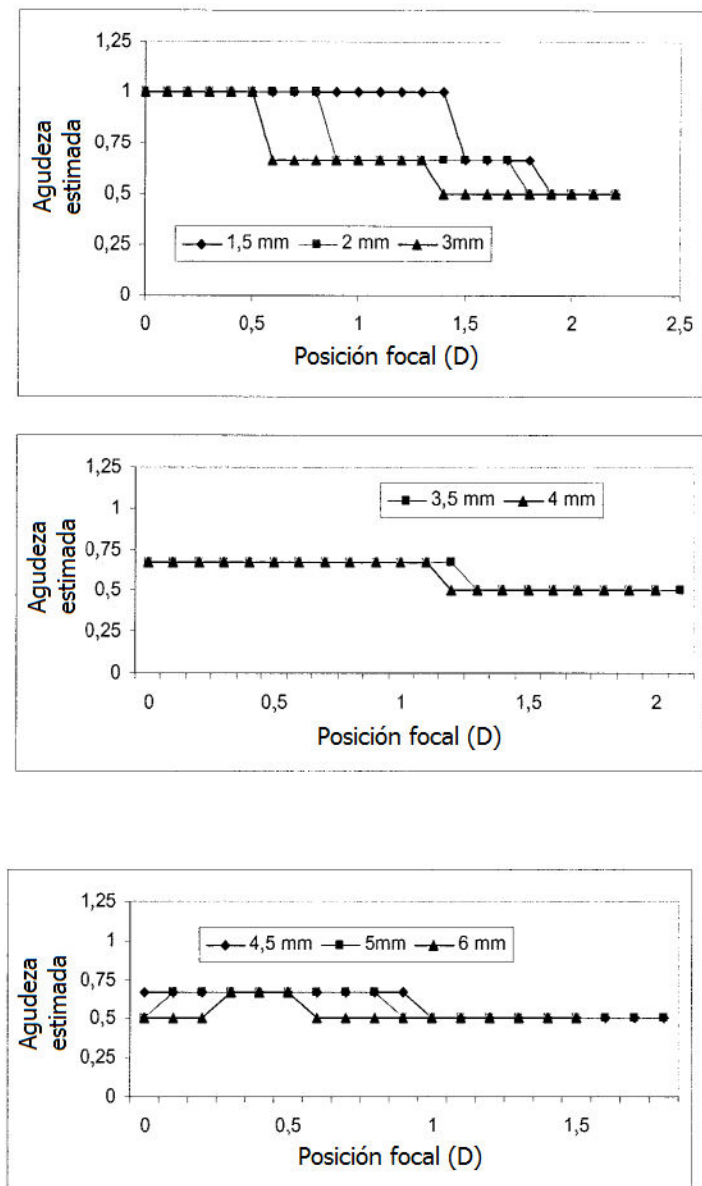


FIG 25

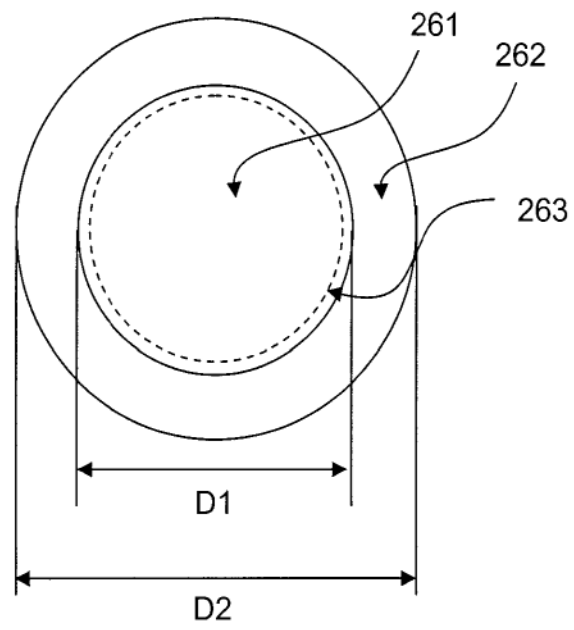


FIG 26