

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 660 408**

51 Int. Cl.:

G02B 3/10 (2006.01)

G02B 5/18 (2006.01)

G02B 27/46 (2006.01)

G02C 7/04 (2006.01)

A61F 2/16 (2006.01)

G02B 27/00 (2006.01)

G02B 27/58 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.08.2005 PCT/IL2005/000868**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.02.2006 WO06018834**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.08.2005 E 05770097 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.11.2017 EP 1779152**

54 Título: **Método y sistema para extender la profundidad de foco**

30 Prioridad:

16.08.2004 US 601638 P

28.10.2004 US 974943

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

22.03.2018

73 Titular/es:

**BRIEN HOLDEN VISION INSTITUTE (100.0%)
Level 4, Rupert Myers Building, Gate 14 Barker
Street, University of New South Wales
Kensington, New South Wales 2052, AU**

72 Inventor/es:

ZALEVSKY, ZEEV

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 660 408 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

Método y sistema para extender la profundidad de foco.

5 Campo de la invención

La presente invención se encuentra de manera general en el campo de los sistemas de formación de imagen, y se refiere a una disposición de lentes de formación de imagen con profundidad de foco aumentada.

10 Antecedentes de la invención

La extensión de la profundidad de foco de los sistemas de formación de imagen es una tecnología esencial muy importante que permite su incorporación en diversas aplicaciones, incluyendo entre otras aplicaciones relacionadas con la medicina en las que deben insertarse elementos, tales como cámaras, en el cuerpo con el fin de observar y detectar tejidos problemáticos; así como la industria oftalmológica incluyendo cristales para gafas, lentes de contacto, lentes intraoculares u otras lentes insertadas quirúrgicamente en el ojo. La solución de profundidad de foco extendida también es necesaria para dispositivos ópticos como microscopios o cámaras para aplicaciones industriales, médicas, de vigilancia o consumo, en las que se requiere el enfoque de luz y en las que actualmente está implementándose el enfoque mediante una pluralidad de lentes con la necesidad del desplazamiento relativo entre la disposición de enfoque y un plano de imagen y/u objeto, mediante movimiento mecánico, accionado o bien manualmente o bien electrónicamente.

Se han desarrollado diversos enfoques para obtener una profundidad de foco extendida de un sistema óptico. Uno de los enfoques conocidos, desarrollado por el inventor de la presente invención, se divulga en el documento WO 03/076984. Esta técnica proporciona una formación de imagen de profundidad de campo extendida totalmente óptica. Un sistema de formación de imagen produce imágenes de calidad aceptable de objetos que están ubicados en una amplia variedad de distancias del sistema de formación de imagen. Una realización preferida del sistema de formación de imagen incluye un objeto, una lente auxiliar, una máscara de fase compuesta y un sensor dispuesto a lo largo de un eje óptico. Se enfoca la luz procedente del objeto mediante la lente auxiliar en tándem con la máscara de fase compuesta, produciéndose una imagen que incide en el detector. Esta técnica se basa en colocar un elemento de fase con alta resolución espacial encima de la abertura de lente de tal manera que se genera una serie continua de distancia focal.

Se divulga otro enfoque, por ejemplo, en las siguientes publicaciones: documentos US 6.069.738; US 6.097.856; WO 99/57599; WO 03/052492. Según este enfoque, se utiliza una máscara de fase cúbica en el plano de la abertura, y se requiere procesamiento digital posterior para obtener una imagen enfocada. Más específicamente:

El documento US 6.069.738 divulga un aparato y métodos para extender la profundidad de campo en sistemas de proyección de imagen. Un sistema óptico para proporcionar una imagen enfocada, con profundidad de campo extendida sobre una superficie de proyección incluye un codificador de luz o máscara codificada para que precede a la luz para incluir información de objeto (o, de manera equivalente, información sobre la imagen deseada), y una máscara de profundidad de campo extendida (EDF), para extender la profundidad de campo del sistema de proyección. Además de incluir información de objeto, la máscara codificada codifica la luz procedente de la fuente de luz para tener en cuenta las variaciones introducidas por la máscara EDF al extender la profundidad de campo, de modo que no se requiere procesamiento posterior.

El documento US 6.097.856 divulga un aparato y método para reducir los errores de formación de imagen en sistemas de formación de imagen que presentan una profundidad de campo extendida. Un sistema de formación de imagen optoelectrónico mejorado está adaptado para su utilización con objetos iluminados con luz incoherente, y que produce imágenes finales que presentan un contenido reducido de errores de formación de imagen. El sistema de formación de imagen incluye un conjunto óptico para formar una imagen intermedia del objeto del que va a formarse una imagen, un sensor de imagen para recibir la imagen intermedia y producir una señal de imagen intermedia, y medios de procesamiento para procesar la señal de imagen intermedia para producir una señal de imagen final que presenta un contenido reducido de errores de formación de imagen. Se logró una reducción del contenido de errores de formación de imagen, en parte, incluyendo en el conjunto óptico una máscara de fase para hacer que la OTF del conjunto óptico sea relativamente invariable a lo largo de un intervalo de distancias de trabajo, y una máscara de amplitud que presenta una transmitancia que disminuye de manera continua en función de la distancia desde el centro de la misma. La reducción del contenido de errores de formación de imagen también se logró, en parte, incluyendo en los medios de procesamiento una función de recuperación generalizada mejorada que varía según por lo menos la IOTF calculada no ideal del conjunto óptico en condiciones de foco aproximadamente óptimo.

El documento WO 99/57599 divulga un sistema óptico para aumentar la profundidad de campo y disminuir la sensibilidad a la longitud de onda de un sistema óptico incoherente. El sistema incorpora una máscara óptica para fines especiales en el sistema incoherente. La máscara óptica se ha diseñado para hacer que la función de transferencia óptica permanezca esencialmente constante dentro de cierto alcance desde la posición enfocada.

El procesamiento de señales de la imagen intermedia resultante anula los efectos de modificación de la transferencia óptica de la máscara, dando como resultado una imagen enfocada sobre una profundidad de campo aumentada. Generalmente, la máscara se coloca en o cerca de una imagen o tope de apertura del tope de apertura del sistema óptico. Preferiblemente, la máscara modifica solo la fase y no la amplitud de la luz, aunque puede cambiarse la amplitud mediante filtros asociados o similares. La máscara puede utilizarse para aumentar el alcance útil de sistemas pasivos de determinación de alcance.

El documento WO 03/052492 divulga una técnica que proporciona una profundidad de foco extendida (EDF) a ojos humanos mediante la modificación de lentes de contacto, implantes intraoculares, o la superficie del propio ojo. Esto se consigue aplicando variaciones de fase seleccionadas al elemento óptico en cuestión (por ejemplo, variando el grosor de superficie). Las variaciones de fase codifican mediante EDF el frente de onda y hacen que la función de transferencia óptica permanezca esencialmente constante dentro de cierto alcance lejos de la posición enfocada. Esto proporciona una imagen codificada en la retina. El cerebro humano decodifica esta imagen codificada, dando como resultado una imagen enfocada sobre una profundidad de foco aumentada.

Aún otros enfoques, divulgados por ejemplo en la patente US n° 6.554.424 (así como las publicaciones de solicitud de patente US 20040114103; 20040114102; y 20030142268) y el documento US 4.955.904, utilizan apodización del plano de apertura. Más específicamente:

El documento US 6.554.424 describe un sistema y método para aumentar la profundidad de foco del ojo humano. El sistema se compone de un cuerpo de lente, un elemento óptico en el cuerpo de lente configurado para producir interferencia luminosa, y una apertura óptica de tipo estenopeica sustancialmente en el centro del elemento óptico. El elemento óptico puede estar configurado para producir dispersión de luz o componerse de un material reflectante de luz. Alternativamente, el elemento óptico puede aumentar la profundidad de foco mediante una combinación de interferencia luminosa, dispersión de luz, reflexión de luz y/o absorción de luz. El elemento óptico también puede estar configurado como una serie de círculos concéntricos, un material entretejido, un patrón de partículas o un patrón de curvaturas. Un método implica examinar a un paciente para una lente oftálmica utilizando un dispositivo de examen estenopeico en la lente para aumentar la profundidad de foco del paciente. Otro método comprende implantar quirúrgicamente una máscara en el ojo del paciente para aumentar la profundidad de foco.

El documento US 4.955.904 describe una lente intraocular con máscara para su implantación en un ojo humano. La máscara, que bloquea solo parte del cuerpo de lente, junto con la pupila del ojo, define una pequeña apertura en el ojo cuando se contrae la pupila, aumentando de ese modo la profundidad de foco, como lo hace una cámara estenopeica. Cuando se dilata la pupila del ojo, se permite que pase luz adicional a través de la pupila alrededor de la máscara y que alcance la retina para permitir que una persona vea en condiciones de luz más tenue. En una realización, la máscara define una pequeña apertura circular y un anillo exterior más grande; la pequeña apertura circular presenta una potencia adicional intermedia entre la que es necesaria para la visión de lejos y de cerca. También se proporciona un método para tratar a un paciente con cataratas que comprende reemplazar el cristalino del paciente por esta lente intraocular con máscara.

Se divulgan algunas otras técnicas de mejora de la visión en las siguientes publicaciones de patente:

La patente US n.º 5.748.371 divulga sistemas ópticos de profundidad de campo extendida. El sistema para aumentar la profundidad de campo y disminuir la sensibilidad a la longitud de onda y los efectos de aberraciones que producen un enfoque erróneo de la lente de un sistema óptico incoherente incorpora una máscara óptica para fines especiales en el sistema incoherente. La máscara óptica se ha diseñado para hacer que la función de transferencia óptica permanezca esencialmente constante dentro de cierto alcance desde la posición enfocada. El procesamiento de señales de la imagen intermedia resultante anula los efectos de modificación de la transferencia óptica de la máscara, dando como resultado una imagen enfocada sobre una profundidad de campo aumentada. Generalmente, la máscara se coloca en un plano principal o la imagen de un plano principal del sistema óptico. Preferiblemente, la máscara modifica solo la fase y no la amplitud de la luz. La máscara puede utilizarse para aumentar el alcance útil de sistemas pasivos de determinación de alcance.

El documento WO 01/35880 divulga una lente esférica multifocal, una superficie óptica en las proximidades de la pupila de una persona para corregir la presbicia, un método para obtener esa superficie óptica, y un sistema de cirugía con láser para llevar a cabo el método. La superficie óptica incluye una primera área de visión, una segunda área de visión que rodea la primera área, y una tercera área de visión que rodea la segunda área de visión, presentando la primera área de visión una primera potencia sustancialmente individual, presentando la segunda área de visión un intervalo de potencias, presentando la tercera área de visión una segunda potencia sustancialmente individual distinta de la primera potencia individual, presentando por lo menos una de las áreas de visión primera, segunda y tercera una superficie esférica, y presentando las demás áreas superficies esféricas. El método incluye remodelar la córnea para obtener esta superficie óptica. La córnea puede remodelarse en la superficie anterior o una superficie subyacente mediante ablación o contracción de colágeno, en la que se realiza la ablación aplicando una técnica de láser de excímero, láser quirúrgico, corte con agua, corte con fluido, corte con líquido o corte con gas. El método también incluye obtener esta superficie óptica

colocando una lente de contacto que presenta las características ópticas deseadas en la córnea. El sistema de cirugía con láser incluye un generador de rayos láser y un controlador de rayos láser para regular el rayo que incide sobre la córnea para retirar un volumen seleccionado de tejido corneal de una región en una zona óptica de la córnea con la radiación de ablación, formándose de ese modo una región reestructurada que presenta una primera área de visión, una segunda área de visión que rodea la primera área, y una tercera área de visión que rodea la segunda área de visión.

La patente US n.º 5.965.330 divulga métodos para fabricar una lente con máscara anular que presenta bordes de reducción de difracción. Según esta técnica, el cuerpo de lente presenta una máscara anular que forma un "borde suave" disminuyendo gradualmente la transmisividad radialmente desde la abertura central hasta el área de máscara anular. Los métodos introducen niveles variables de un agente de coloración (por ejemplo, tinte) en determinadas partes de la lente.

El documento WO 03/012528 describe un aparato para generar un rayo de luz con una profundidad de foco extendida. El aparato incluye una máscara de fase binaria que genera un patrón de difracción que incluye un anillo principal brillante y dos anillos lobulares laterales, una máscara de abertura anular que solo pasa por parte del patrón de difracción, y una lente que hace que la luz que pasa a través de la abertura anular converja hacia y a través del eje óptico. Tiene lugar interferencia constructiva donde la luz convergente atraviesa el eje óptico, generando un rayo de luz que presenta una profundidad de foco extendida.

Las patentes US n.ºs 5.786.883; 5.245.367 y 5.757.458 describen una lente de contacto con máscara anular diseñada para accionarse con el funcionamiento normal de la pupila humana. Una máscara anular forma una pequeña abertura de tipo estenopeica en la lente de contacto permitiendo la corrección de foco continua. El diámetro exterior de la máscara anular permite que el usuario transmita más energía luminosa a través de la pupila a medida que disminuyen los niveles de brillo. La lente de contacto puede estar estructurada con dos correcciones ópticas independientes y distintas, tanto en la pequeña región de abertura como en la región más allá de la máscara anular. Por tanto, se logra la formación de imagen funcional para iluminación tanto brillante como tenue, y a lo largo de un amplio intervalo de distancias de visualización.

La patente US n.º 5.260.727 divulga lentes de contacto e intraoculares de amplia profundidad de foco. Según esta técnica, la potencia de la lente puede ser constante pero la amplitud y fase de la onda a través de la abertura de la pupila son variables. La lente puede construirse oscureciendo regiones de la misma según una función matemática, por ejemplo, una distribución gaussiana o función de Bessel a lo largo de una geometría predeterminada, tal como por ejemplo, concéntrica, paralela o radial. La lente puede ser de potencia individual o de potencia múltiple, por ejemplo, del tipo bifocal.

La patente US n.º 5.905.561 divulga una lente con máscara anular para corrección de visión que presenta bordes de reducción de difracción. El cuerpo de lente presenta una máscara anular que forma un "borde suave" disminuyendo gradualmente la transmisividad radialmente desde la abertura central hasta el área de máscara anular.

La patente US n.º 5.980.040 describe una lente estenopeica y lente de contacto. La lente de contacto comprende un cuerpo de lente ópticamente transparente que presenta una superficie cóncava adaptada a la curvatura del ojo del paciente y una superficie convexa. La lente presenta tres regiones: (1) una región anular de una primera potencia óptica; (2) en el centro de dicha región anular, que está también en el centro óptico de dicha lente, una abertura de tipo sustancialmente estenopeico; y (3) una segunda región anular más grande exterior a la primera región anular.

La patente US n.º 5.662.706 divulga una lente con máscara anular de transmisividad variable para el tratamiento de aberraciones ópticas, tales como miopía nocturna, aberración esférica, aniridia, queratocono, cicatrices en la córnea, queratoplastia penetrante y complicación tras cirugía refractiva. La lente presenta una máscara anular que presenta una abertura mayor que una lente de contacto estenopeica convencional. La abertura que presenta un borde interior "suave" y máscara que presenta una transmisividad gradualmente creciente radialmente hacia el borde exterior de la máscara.

La patente US n.º 5.225.858 describe una lente oftálmica multifocal adaptada para su implantación en el ojo o que ha de disponerse sobre o en la córnea. La lente presenta un eje óptico, una zona central y una pluralidad de zonas anulares que circunscriben la zona central. Dos de las zonas anulares presentan una primera región con una potencia de corrección de visión de lejos y una segunda región con una potencia de corrección de visión de cerca. En una realización de LIO, la potencia de corrección de visión entre lejos y cerca es progresiva, y cada una de las segundas regiones presenta un segmento principal en el que la potencia de corrección de visión de cerca es sustancialmente constante. La potencia en la zona central varía.

La patente US No. 6.554.859 divulga una lente intraocular para su implantación en un ojo de un paciente. La lente incluye un elemento óptico multifocal y un conjunto de movimiento. El elemento óptico presenta máxima potencia de adición que es menor que la potencia de adición requerida para visión de cerca total para un ojo

pseudofáquico. El conjunto de movimiento se acopla con el elemento óptico y está adaptado para actuar conjuntamente con el ojo del paciente para realizar el movimiento de adaptación del elemento óptico en el ojo. También se proporcionan sistemas de lentes que incluyen dos elementos ópticos y dos conjuntos de movimiento. Las lentes intraoculares y los sistemas de lentes son particularmente útiles cuando se implantan en los ojos de un paciente después de la extracción del cristalino natural.

Las patentes US n.ºs 6.576.012 y 6.537.317 divulgan un sistema de lente binocular para mejorar la visión de un paciente. El sistema incluye lente oftálmica primera y segunda. Cada una de estas lentes está adaptada para su implantación en un ojo o para disponerse sobre o en la córnea. La primera lente presenta una primera potencia dióptrica inicial para la corrección de visión de lejos y la segunda lente oftálmica presenta una segunda potencia dióptrica inicial para la corrección de visión distinta a la de lejos. Las lentes oftálmicas pueden ser lentes intraoculares que se implantan en los ojos de un paciente que o presenta el cristalino natural o después de la extracción del cristalino natural.

La patente US n.º 6.474.814 divulga una lente oftálmica multifocal con abertura inducida. Las lentes multifocales están definidas por superficies ópticas esféricas no cónicas. Diversas formas de superficie alternativas proporcionan una región central de visión de lejos rodeada por un escalón óptico. El escalón óptico presenta una potencia creciente rápidamente en la dirección radial que crea una abertura inducida a través de la que se induce que se concentren los elementos corticales del sistema de visión. La abertura inducida da como resultado una claridad aumentada en la visión de lejos. Se definen superficies ópticas esféricas no cónicas para producir las distribuciones de potencia óptica deseadas. Estas funciones de superficie también se proporcionan en forma de series polinómicas para mayor simplicidad de utilización en tornos accionados por ordenador para conformar lentes de contacto. Esta técnica se refiere a lentes de contacto, lentes esclerales, lentes intraoculares y lentes impresas o conformadas quirúrgicamente dentro del tejido corneal.

La patente US n.º 6527389 describe una lente oftálmica multifocal mejorada, que presenta una pluralidad de zonas de potencia alterna con una potencia variable de manera continua dentro de cada zona, así como en la transición de una zona a otra. Dicho de otro modo, se proporcionan una pluralidad de zonas concéntricas (por lo menos dos) en las que la variación de corrección de visión de lejos a cerca es continua, es decir, de la potencia focal de corrección de cerca a la de la potencia focal de corrección de lejos, luego de vuelta a de cerca, y de nuevo de vuelta a de lejos, o viceversa. Este cambio es continuo (progresivo), sin ningún cambio de corrección abrupto, ni "bordes". Se divulgan dos versiones de esta técnica. En la primera versión se consigue una variación de potencia continua, alterna mediante una curvatura que cambia de manera continua de la superficie posterior de la lente, alterando de ese modo el ángulo de impacto de rayos de luz en el ojo. En la segunda versión, se consigue una variación de potencia continua, alterna creando características de superficie no homogéneas que presentan índices de material de refracción que varían de manera continua en la dirección radial de la lente (hacia fuera del eje óptico).

La patente US n.º 5.715.031 divulga diseños de lente multifocal esférica concéntrica que utilizan una combinación de una superficie frontal esférica, que da como resultado reducción de la aberración y potenciación de la visión de contraste, junto con una superficie trasera multifocal concéntrica, para producir un diseño de lente que proporciona una visión clara de lejos y también de cerca sin una pérdida de contraste que es típico normalmente de los diseños de lente multifocal concéntrica, de visión simultánea de la técnica anterior. La superficie esférica mejora la función de transferencia de modulación (MTF) de la combinación de lente ocular que mejora el foco y contraste de imágenes tanto de lejos como de cerca. La forma de diseño es válida para lentes de contacto y lentes intraoculares.

La patente US n.º 6.024.447 divulga una lente oftálmica monofocal potenciada para proporcionar una potencia de corrección de visión monofocal con una profundidad de foco potenciada. La lente está adaptada para implantarse en un ojo, colocarse sobre el ojo, o disponerse en una córnea del ojo. La lente oftálmica incluye una potencia dióptrica inicial para la corrección de visión de lejos, una primera zona que presenta una primera potencia de corrección de visión, y una segunda zona que presenta una segunda potencia de corrección de visión. La segunda zona está ubicada radialmente hacia fuera de la primera zona. La primera zona incluye una potencia de corrección de visión de cerca, y la segunda zona incluye una potencia de corrección de visión de lejos. El valor dióptrico máximo de la primera zona es de aproximadamente 0,7 dioptrías por encima de las dioptrías iniciales, y el valor dióptrico mínimo de la segunda zona es de aproximadamente 0,5 dioptrías por debajo de la potencia dióptrica inicial. La primera zona está adaptada para enfocar la luz a una primera distancia predeterminada de la retina del usuario, y la segunda zona está adaptada para enfocar la luz a una segunda distancia predeterminada de la retina del usuario. La segunda distancia predeterminada es aproximadamente opuesta e igual a la primera distancia predeterminada. Una tercera zona, que es sustancialmente similar a la primera zona, está ubicada radialmente hacia fuera de la segunda zona, y una cuarta zona, que es sustancialmente similar a la segunda zona, está ubicada radialmente hacia fuera de la tercera zona. Una tercera potencia de corrección de visión de la tercera zona es aproximadamente igual a la primera potencia de corrección de visión de la primera zona, y una cuarta potencia de corrección de visión de la cuarta zona es aproximadamente igual a la segunda potencia de corrección de visión de la segunda zona.

La patente US n.º 6.451.056 describe una lente intraocular para profundidad de foco aumentada. La lente intraocular proporciona una profundidad de foco sustancialmente aumentada para una visión precisa de cerca y de lejos con un elemento óptico mucho más delgado que un cristalino natural, siendo la lente rígida, abovedada de manera posterior y adaptada para la colocación posterior en el saco capsular. El elemento óptico se sitúa sustancialmente más lejos de la córnea que un cristalino natural, de modo que el cono de luz que sale del elemento óptico para incidir sobre la retina es mucho menor que el cono de luz de un cristalino natural. Normalmente, el elemento óptico puede ser de aproximadamente 1,0 mm de grosor y su distancia de la córnea de 7,0-8,0 mm.

El documento WO 03/032825 divulga un método de diseño de una lente de contacto u otra corrección para proporcionar corrección de la presbicia a un paciente. El método se basa en datos de medición de aberración de frente de onda para proporcionar una corrección de la mejor forma. Preferiblemente, la corrección es en forma de una lente de contacto de visión alternante del tipo de traslación multifocal o una lente de corrección del tipo de visión simultánea. Un método para diseñar una corrección para mejorar la visión de una persona se refiere a corregir aberraciones de alto orden de tal manera que la cantidad residual de la aberración rotacionalmente simétrica de alto orden es mayor que la cantidad residual de la aberración rotacionalmente asimétrica de alto orden después de la corrección. El método de diseño se refiere a corregir aberraciones asimétricas de alto orden inducidas por el descentrado de una lente de contacto multifocal que presenta aberración esférica residual que proporciona una profundidad de campo aumentada.

El documento EP 0369561 divulga un sistema y procedimiento para producir lentes difractivas de contacto e intraoculares. El sistema óptico incluye los siguientes elementos principales en alineación óptica a lo largo de un eje óptico, para lograr las etapas indicadas del procedimiento: un láser para la emisión de luz ultravioleta a lo largo del eje óptico; una máscara de placa zonal en la trayectoria de irradiación mediante el láser; y una lente de formación de imagen para proyectar, con la radiación procedente del láser, una imagen de la máscara en la superficie interior cóncava de una lente ocular montada de manera coincidente con la superficie de imagen del sistema óptico, sometiendo de ese modo a ablación la lente ocular como imagen de la máscara para generar una placa zonal de fase en la lente ocular. El rayo láser barre la máscara de placa zonal para generar una imagen compuesta en la superficie de imagen. Alternativamente, la placa zonal de fase se genera en la superficie cóncava de un primordio de vidrio en la superficie de imagen para formar una herramienta a partir de la cual se reproducen moldes, y a su vez lentes. La fuente de luz es un láser de excímero de fluoruro de argón, que emite a 193 nm. La lente es una lente de aumento variable para proyectar imágenes de diverso tamaño de la máscara para producir placas zonales de diversas potencias según se desee.

Sin embargo, las técnicas conocidas presentan inconvenientes tales como una dispersión inevitable de una parte importante de la energía hacia las regiones exteriores de un campo de visión del sistema; la necesidad de procesamiento digital posterior; que dañan la transmisión de frecuencias espaciales y la eficiencia energética.

Sumario de la invención

La presente invención resuelve los problemas anteriores proporcionando una disposición de formación de imagen tal como se define mediante la reivindicación 1. Se definen aspectos ventajosos adicionales de la invención en las reivindicaciones dependientes. En determinados aspectos, se proporciona una disposición de formación de imagen que utiliza un elemento óptico ubicado adyacente a, unido a la superficie de, o incorporado dentro de una abertura efectiva de la disposición de formación de imagen. Debe observarse que el término "abertura efectiva de la disposición de formación de imagen" utilizada en la presente memoria significa una abertura de recepción de luz, que puede ser del tamaño real de una propia lente de formación de imagen o una abertura delante de la lente de formación de imagen, como puede ser el caso, por ejemplo la pupila del ojo en aplicaciones oftálmicas. También debe observarse que la disposición de formación de imagen de la presente invención puede utilizar una disposición de lentes (disposición de lentillas), en cuyo caso se utiliza una disposición de elementos ópticos, estando cada elemento óptico asociado con una lente correspondiente de las lentes.

El elemento óptico está configurado en determinados aspectos como elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo, de capa delgada que codifica la abertura de lente para proporcionar un efecto totalmente óptico de extensión de la profundidad de foco. El elemento óptico puede estar configurado como elemento puro de fase o como elemento que afecta a la fase y la amplitud. El término "totalmente óptico" utilizado en la presente memoria significa que se elimina la necesidad de procesamiento de imagen o por lo menos se reduce sustancialmente.

Por tanto, el elemento óptico es insensible a la longitud de onda y la iluminación policromática, no dispersa energía hacia las regiones exteriores del campo de visión, proporcionando por tanto una eficiencia energética muy alta en la región de interés (próxima al 100%), y no requiere apodización. Es importante observar que no puede lograrse una eficiencia tan alta mediante un elemento óptico difractivo ni siquiera si es un elemento puro de fase (del inglés, *phase-only element*), por la divergencia de luz a órdenes de difracción no deseados. Puesto que la técnica de la presente invención no requiere procesamiento digital posterior, es adecuada para aplicaciones oftálmicas u otras aplicaciones "no basadas en ordenador".

El elemento óptico de la presente invención está configurado para definir una máscara formada por una disposición bidimensional de elementos de retícula perpendiculares entre sí (preferiblemente una máscara binaria) de transiciones de frecuencias espacialmente bajas. Esto puede lograrse en realidad diseñando el elemento óptico de modo que se defina por lo menos una región de transición en forma de líneas, que va a estar rodeada por las regiones de la lente de formación de imagen, en el plano de la lente de formación de imagen. Esta por lo menos una región del elemento óptico junto con las regiones de la lente de formación de imagen definen un patrón predeterminado formado por características ópticamente transparentes separadas de propiedades ópticas diferentes (es decir, que afectan de diferente manera a la fase de la luz que pasa a través de la disposición de lentes de formación de imagen).

La(s) posición/posiciones de la(s) región/regiones de transición del elemento óptico dentro del plano de la lente de formación de imagen 30 (es decir, el plano efectivo de la abertura) se seleccionan, considerando por lo menos el tamaño de abertura efectiva de la lente de formación de imagen. Estas posiciones se seleccionan apropiadamente para generar una relación de interferencia de fase apropiada entre partes de luz que pasan a través de diferentes regiones de la disposición de lentes correspondientes a las diferentes características del patrón, para permitir de ese modo la reducción de un factor de fase cuadrático que resulta de la luz que se desenfoca con respecto a la lente de formación de imagen y maximizar por tanto una función de transferencia óptica (OTF) desenfocada de la disposición de lentes de formación de imagen.

Tal como se indicó anteriormente, con el fin del diseño de la configuración óptima para el elemento óptico de profundidad de foco extendida (EDOF), ha de tenerse en cuenta la abertura efectiva de la lente de formación de imagen. También han de tenerse en cuenta la distancia focal y/o la distribución de potencia óptica de la lente de formación de imagen: puesto que la EDOF no presenta potencia óptica, puede añadirse a una lente de formación de imagen con el fin de cambiar el alcance de profundidad de foco extendida alrededor de una determinada potencia óptica dada.

La geometría y las dimensiones óptimas del elemento de EDOF (es decir, por lo menos una región de transición) se determinan utilizando un algoritmo de optimización (basado en un enfoque numérico o analítico, dando como resultado una profundidad de foco extendida totalmente óptica de frecuencia espacialmente baja), que determina N posición/posiciones para la(s) región/regiones de transición del elemento dentro de una lente de formación de imagen dada (es decir, para un tamaño de abertura efectiva dado).

Considerando las aplicaciones oftálmicas, en las que la abertura efectiva de la lente (pupila del ojo, o lente de contacto, o lente de gafas) puede definirse mediante un determinado intervalo relativamente estrecho de valores comunes para la mayoría de los pacientes, puede diseñarse la EDOF de la presente invención para que sea universal para una gran cantidad de pacientes. Tal EDOF universal puede estar configurada para permitir la región de profundidad de foco equivalente a 5 dioptrías para la abertura efectiva de 2-3 mm. Para un menor porcentaje de pacientes que presentan una mayor diferencia entre la visión de cerca y de lejos, el diseño del elemento de EDOF tiene en cuenta la potencia óptica de la lente de formación de imagen con la que está asociado el elemento.

La posición de la(s) transición/transiciones (siendo una transición de fase π para una determinada longitud de onda para la que está diseñada la EDOF) genera invariancia para distorsiones de fase cuadrática (que multiplican la CTF de la lente de formación de imagen, correspondiente al efecto de que se desenfoca) con la operación de autocorrelación. Debido al hecho de que la máscara de abertura (formada por la EDOF y la lente de formación de imagen) se construye a partir de transiciones de frecuencia espacialmente baja, no propaga energías fuera del orden de difracción cero y su eficiencia energética es próxima al 100%.

Debe observarse que la autocorrelación de la CTF se realiza para calcular la función de transferencia óptica (OTF) del sistema de formación de imagen. La posición de la(s) transición/transiciones de EDOF puede calcularse utilizando un algoritmo iterativo en el que se examinan M posiciones y eventualmente se seleccionan aquellas de ellas que proporcionan un contraste máximo de la OTF en una serie de ubicaciones de desenfoco. El significado de la optimización (maximización) del contraste de OTF es en realidad disponer de la OTF desenfocada delimitada tan lejos como sea posible de cero.

El elemento de profundidad de foco extendida (EDOF) de la presente invención está configurado para generar una relación de interferencia de fase apropiada que permita una cancelación significativa del factor de fase cuadrático obtenido debido a que se desenfoca. El elemento de EDOF es un elemento que afecta a la fase (por ejemplo, elemento de máscara binaria puro de fase), que no es un elemento ni refractivo ni difractivo. En contraposición a un elemento refractivo, el filtro de EDOF de la presente invención puede producirse como una capa de fase delgada construida en una técnica litográfica de bajo coste, siendo el grosor de la capa de fase solo de una longitud de onda (por ejemplo, alrededor de 0,5 micrómetros en el caso de iluminación con luz ambiental), de manera similar a los enfoques de fabricación utilizados para los elementos ópticos difractivos convencionales. Por otro lado, en contraposición a elementos ópticos difractivos, la EDOF de la presente invención presenta la(s) característica(s) espacial(es) de frecuencia muy baja. El elemento contiene solo un número muy limitado de

características y periodos a baja frecuencia espacial (periodo de aproximadamente 1.000 longitudes de onda). La propiedad del elemento óptico de la presente invención permite obtener EDOF verdaderamente eficiente energéticamente, puesto que no solo se hace pasar toda la energía a través del propio elemento (es sustancialmente puro de fase) sino que también se concentra toda la energía en la región de interés transversal y longitudinal apropiada (en contraposición a un elemento difractivo que presenta una división energética o bien entre múltiples planos focales longitudinales o bien entre órdenes de difracción transversales).

Así, la alta eficiencia energética (próxima al 100%) del elemento óptico de la presente invención proporciona una profundidad de foco extendida, en contraposición a enfoques basados en la utilización de elementos ópticos difractivos que dividen la energía entre varios órdenes de difracción/planos focales y que son básicamente equivalentes a una menor apertura de lente (que también presenta mayor profundidad de foco). Además, la baja frecuencia espacial del enfoque de la invención elimina su sensibilidad a la longitud de onda y la iluminación policromática que es un tema problemático con elementos ópticos difractivos. Adicionalmente, es importante observar que el enfoque de la invención es una técnica totalmente óptica que no requiere cálculos numéricos, y cuando se utiliza para aplicaciones oftálmicas no supone un procedimiento de adaptación o decodificación basado en la función cerebral puesto que una imagen con profundidad de foco extendida es idéntica a la imagen de un mismo objeto.

Por tanto, se proporciona según un amplio aspecto, una disposición de formación de imagen que comprende: un conjunto de lentes de formación de imagen que incluye por lo menos una lente que presenta una determinada apertura efectiva, y por lo menos un elemento óptico asociado con dicha por lo menos una lente y configurado para proporcionar una profundidad de foco extendida de la disposición de formación de imagen, estando dicho elemento óptico configurado como elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo que define una transición de fase de frecuencia espacialmente baja, definiendo dicho elemento óptico junto con su lente asociada un patrón predeterminado formado por características ópticamente transparentes separadas de propiedades ópticas diferentes, determinándose la posición de por lo menos una región de transición de fase del elemento óptico dentro del plano de lente mediante por lo menos una dimensión de dicha apertura efectiva.

Según otro amplio aspecto, se proporciona una disposición de formación de imagen que comprende: un conjunto de lentes de formación de imagen que incluye por lo menos una lente que presenta una determinada apertura efectiva, y por lo menos un elemento óptico asociado con dicha por lo menos una lente y configurado para proporcionar una profundidad de foco extendida de la disposición de formación de imagen, estando dicho elemento óptico configurado como máscara binaria pura de fase, no difractiva que define una transición de fase de frecuencia espacialmente baja, definiendo dicho elemento óptico junto con su lente asociada un patrón predeterminado formado por características ópticamente transparentes separadas de 5 propiedades ópticas diferentes, determinándose la posición de por lo menos una región de transición de fase del elemento óptico dentro del plano de lente mediante por lo menos una dimensión de dicha apertura efectiva.

Según aún otro aspecto, se proporciona una disposición de formación de imagen que comprende: un conjunto de lentes de formación de imagen que incluye por lo menos una lente que presenta una determinada apertura efectiva, y por lo menos un elemento óptico asociado con dicha por lo menos una lente y configurado para proporcionar una profundidad de foco extendida de la disposición de formación de imagen, estando dicho elemento óptico configurado como elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo que define una transición de fase de frecuencia espacialmente baja, definiendo dicho elemento óptico junto con su lente asociada un patrón predeterminado formado por características ópticamente transparentes separadas de propiedades ópticas diferentes, determinándose la posición de por lo menos una región de transición de fase del elemento óptico dentro del plano de lente mediante por lo menos una dimensión de dicha apertura efectiva de tal manera que el elemento óptico produce una relación de interferencia de fase apropiada entre partes de luz que pasan a través de diferentes regiones de la disposición de formación de imagen correspondientes a las diferentes características del patrón para reducir de ese modo un factor de fase cuadrático que resulta de la luz que se desenfoca con respecto a la lente de formación de imagen y maximizar una función de transferencia óptica (OTP) desenfocada de la disposición de lentes de formación de imagen proporcionando la OPT desenfocada tan lejos como sea posible de cero.

Según aún otro amplio aspecto, se proporciona una disposición de formación de imagen que comprende un conjunto de lentes de formación de imagen que incluye por lo menos una lente que presenta una determinada apertura efectiva, y por lo menos un elemento óptico asociado con dicha por lo menos una lente de formación de imagen y configurado para proporcionar una profundidad de foco extendida de la disposición de formación de imagen, estando dicho elemento óptico configurado como elemento que afecta a la fase, no difractivo que define un determinado patrón de transiciones de fase de frecuencia espacialmente baja dentro de un plano de la lente de formación de imagen, de tal manera que dicho elemento óptico junto con su lente de formación de imagen asociada determina un patrón predeterminado formado por características ópticamente transparentes separadas que afectan de diferente manera fase de la luz que pasa a través de la disposición de formación de imagen, determinándose las posiciones de las transiciones de fase del elemento óptico dentro del plano de la lente de formación de imagen mediante por lo menos una dimensión de dicha apertura efectiva para reducir la sensibilidad de la disposición de formación de imagen a desplazamientos de una función de transferencia

coherente (CTF) de la lente de formación de imagen mientras que se desenfoca.

Según aún otro amplio aspecto, se proporciona una disposición de formación de imagen que comprende una disposición de lentes que presentan, cada una, una determinada abertura efectiva, y una disposición de elementos ópticos estando cada elemento óptico asociado con una lente de la disposición de lentes y que está configurado para proporcionar una profundidad de foco extendida de la disposición de formación de imagen, estando dicho elemento óptico configurado como elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo que define una transición de fase de frecuencia espacialmente baja, definiendo dicho elemento óptico junto con su lente asociada un patrón predeterminado formado por características ópticamente transparentes separadas de propiedades ópticas diferentes, determinándose la posición de por lo menos una región de transición de fase del elemento óptico dentro del plano de lente mediante por lo menos una dimensión de dicha abertura efectiva.

Según aún otro aspecto, se proporciona una lente de formación de imagen para su utilización en gafas de portantes, estando la lente de formación de imagen configurada para definir una determinada abertura efectiva y portando un elemento óptico configurado para proporcionar una profundidad de foco extendida, estando dicho elemento óptico configurado como elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo que define una transición de fase de frecuencia espacialmente baja, definiendo dicho elemento óptico junto con su lente asociada un patrón predeterminado formado por características ópticamente transparentes separadas de propiedades ópticas diferentes, determinándose la posición de por lo menos una región de transición de fase del elemento óptico dentro del plano de lente mediante por lo menos una dimensión de dicha abertura efectiva.

Según aún otro aspecto, se proporciona un dispositivo de visualización que porta una disposición de formación de imagen, que comprende una disposición de lentes de formación de imagen que presentan, cada una, una determinada abertura efectiva, y una disposición de elementos ópticos asociados cada uno con una lente correspondiente de dichas lentes y configurados para proporcionar una profundidad de foco extendida, estando dicho elemento óptico configurado como elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo que define una transición de fase de frecuencia espacialmente baja, definiendo dicho elemento óptico junto con su lente asociada un patrón predeterminado formado por características ópticamente transparentes separadas de propiedades ópticas diferentes, determinándose la posición de por lo menos una región de transición de fase del elemento óptico dentro del plano de lente mediante por lo menos una dimensión de dicha abertura efectiva.

Debe entenderse que un dispositivo de visualización de este tipo puede ser un dispositivo de tipo dinámico para su utilización con o formando parte de un dispositivo electrónico (tal como un teléfono móvil) o puede ser un dispositivo de visualización estático.

Según aún otro aspecto, se proporciona un sistema para crear una imagen de un objeto en un plano de detector, comprendiendo el sistema una disposición de lentes de formación de imagen formada por un conjunto de lentes de formación de imagen que incluye por lo menos una lente que presenta una determinada abertura efectiva y por lo menos un elemento óptico configurado para proporcionar una profundidad de foco extendida de la disposición de formación de imagen, estando dicho elemento óptico configurado como elemento que afecta a la fase, no difractivo que define una transición de fase de frecuencia espacialmente baja, dicho elemento óptico junto con su lente de formación de imagen asociada que define un patrón predeterminado formado por características ópticamente transparentes separadas de propiedades ópticas diferentes, determinándose la posición de por lo menos una región de transición de fase del elemento óptico dentro del plano de la lente de formación de imagen mediante por lo menos una dimensión de dicha abertura efectiva de tal manera que el elemento óptico produce una relación de interferencia de fase apropiada entre partes de luz que pasan a través de diferentes regiones de la disposición de formación de imagen correspondientes a las diferentes características del patrón para permitir de ese modo la reducción de un factor de fase cuadrático que resulta de la luz que se desenfoca con respecto a la lente de formación de imagen y maximizar una función de transferencia óptica (OTF) desenfocada de la disposición de formación de imagen.

Según aún otro aspecto, se proporciona un elemento óptico para su utilización con una lente de formación de imagen para extender la profundidad de foco de formación de imagen, estando el elemento óptico configurado como elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo que define un patrón predeterminado de transiciones de fase de frecuencia espacialmente baja, definiéndose dicho patrón mediante la abertura efectiva de la lente de formación de imagen dada.

Según aún otro aspecto, se proporciona un elemento óptico para su utilización con una lente de formación de imagen para extender la profundidad de foco de formación de imagen, estando el elemento óptico configurado como elemento binario puro de fase, no difractivo que define un patrón predeterminado de transiciones de fase de frecuencia espacialmente baja, definiéndose dicho patrón mediante la abertura efectiva de la lente de formación de imagen dada. Según aún otro aspecto, se proporciona un elemento óptico para extender la profundidad de foco de formación de imagen, estando el elemento óptico configurado como elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo que define una transición de fase de frecuencia espacialmente baja.

Según aún otro aspecto, se proporciona un elemento óptico para extender la profundidad de foco de formación

de imagen, estando el elemento óptico configurado como elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo que define una transición de fase de frecuencia espacialmente baja, definiendo el elemento óptico un patrón predeterminado de regiones de transición de fase, estando dichas regiones de transición dispuestas según la abertura efectiva de una lente de formación de imagen dada para la que está diseñado el elemento óptico, para proporcionar dichas regiones de transición del elemento óptico dentro de posiciones predeterminadas en el plano de la lente de formación de imagen, para proporcionar la replicación periódica de una forma de fase lateral de un campo de luz que se propaga a través de la lente de formación de imagen con dicho elemento óptico.

Según aún otro aspecto, se proporciona un elemento óptico para extender la profundidad de foco de formación de imagen, estando el elemento óptico configurado como elemento binario puro de fase, no difractivo que define una transición de fase de frecuencia espacialmente baja, definiendo el elemento óptico un patrón predeterminado de regiones de transición de fase, estando dichas regiones de transición dispuestas según la abertura efectiva de una lente de formación de imagen dada para la que está diseñado el elemento óptico, para proporcionar dichas regiones de transición del elemento óptico 5 dentro de posiciones predeterminadas en el plano de la lente de formación de imagen, para proporcionar la replicación periódica de una forma de fase lateral de un campo de luz que se propaga a través de la lente de formación de imagen con dicho elemento óptico.

Según aún otro aspecto, se proporciona un método para proporcionar una determinada profundidad de foco extendida de un sistema de formación de imagen, comprendiendo el método 10 aplicar una codificación de abertura a una lente de formación de imagen que presenta una determinada abertura efectiva, aplicando a la lente de formación de imagen un elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo configurado para definir una disposición de transiciones de fase de frecuencia espacialmente baja y proporcionan de ese modo un patrón predeterminado de características ópticamente transparentes sustancialmente separadas de propiedades ópticas diferentes dentro del plano de la lente de formación de imagen, produciendo de ese modo una relación de interferencia de fase entre partes de luz que pasan a través de diferentes regiones de la disposición de lentes correspondientes a las diferentes características del patrón para reducir un factor de fase cuadrático que resulta de la luz que se desenfoca con respecto a la lente de formación de imagen y maximizar una función de transferencia óptica (OTF) desenfocada de la disposición de lentes de formación de imagen.

Según aún otro aspecto, se proporciona un método para proporcionar una determinada profundidad de foco extendida de un sistema de formación de imagen, comprendiendo el método diseñar un elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo que va a utilizarse con una lente de formación de imagen que presenta una determinada abertura efectiva, comprendiendo dicho diseño 25 seleccionar N posiciones para transiciones de fase dentro de la abertura efectiva de la lente de formación de imagen como aquellas que proporcionan un máximo contraste de una función de transferencia óptica (OTF) del sistema de formación de imagen en una serie de ubicaciones de desenfoque, proporcionando se ese modo la OTF desenfocada tan lejos como sea posible de cero.

Breve descripción de los dibujos

Con el fin de entender la invención y para ver cómo puede llevarse a cabo en la práctica, se describirán a continuación realizaciones preferidas, a modo de ejemplo no limitativo únicamente, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1A es una ilustración esquemática de un ejemplo de un sistema de formación de imagen que utiliza una disposición de lentes de formación de imagen configuradas según la presente invención;

la figura 1B ilustra esquemáticamente otro ejemplo de una disposición de lentes de formación de imagen de la presente invención;

la figura 1C ilustra esquemáticamente aún otro ejemplo de una disposición de lentes de formación de imagen de la presente invención, adecuada para utilizarse con un dispositivo de visualización;

las figuras 1D y 1E muestran dos ejemplos, respectivamente, del elemento óptico de la presente invención que se implementa solidario con una lente de formación de imagen;

las figuras 2A a 2C muestran tres ejemplos, respectivamente, del contorno de un elemento óptico adecuado para utilizarse en la disposición de lentes de formación de imagen, en la que los elementos ópticos de las figuras 2B y 2C son según la invención y el elemento óptico de la figura 2A no lo es;

las figuras 3A a 3D ilustran el efecto de la presente invención en comparación con el enfoque convencional;

las figuras 4A a 4I ejemplifican unas imágenes faciales obtenidas variando el parámetro de desenfoque $4\psi/D^2$ entre -0,2 (figura 4A) y 0,2 (figura 4I) en escalones de 0,05, para el caso en el que se utiliza el elemento óptico de la presente invención;

las figuras 5A a 5I ejemplifican unas imágenes faciales obtenidas variando el parámetro de desenfoque $4\psi/D^2$ entre -0,2 (figura 5A) y 0,2 (figura 5I) en escalones de 0,05, para el caso en el que no se utiliza el elemento óptico de la presente invención;

5 la figura 6 muestra los resultados de examen de la sensibilidad del elemento óptico con variaciones de la longitud de onda;

10 las figuras 7A a 7D muestran los resultados experimentales para formar una imagen de una roseta con y sin el elemento de EDOF de la invención: correspondiendo la figura 7A a la posición de enfoque de la roseta sin elemento de EDOF, correspondiendo la figura 7B a la posición de enfoque con el elemento de EDOF, correspondiendo la figura 7C a la posición de desenfoque de la roseta sin elemento de EDOF, y correspondiendo la figura 7D a la posición de desenfoque con el elemento de EDOF;

15 las figuras 8A a 8D y las figuras 9A a 9H muestran la verificación experimental de la técnica de profundidad de foco extendida de la presente invención para iluminación no coherente espacialmente policromática;

la figura 10A ilustra el rendimiento de la aplicación de profundidad de foco oftálmica de la presente invención, para el caso en el que el elemento óptico está unido a una lente de contacto; y

20 la figura 10B ilustra el rendimiento de la aplicación de profundidad de foco oftálmica de la presente invención, para el alcance mínimo en el que se obtiene enfoque con y sin el elemento óptico de la presente invención.

Descripción detallada de la invención

25 Haciendo referencia a la figura 1A, se ilustra esquemáticamente un sistema de formación de imagen 10 que utiliza una disposición de lentes de formación de imagen 12 de la presente invención. El sistema de formación de imagen 10 está formado por un objeto 13 del que va a formarse una imagen, la disposición de lentes de formación de imagen 12 incluye un determinado número de lentes 12A (generalmente por lo menos una lente, mostrándose una lente individual en el presente ejemplo) que presenta una determinada abertura efectiva D (que en el presente ejemplo es el diámetro de la lente), y un determinado número de elementos ópticos 12B (elemento individual en el presente ejemplo) asociado con la(s) lente(s) 12A. Tal elemento óptico 12B está configurado y puede funcionar como un elemento de profundidad de foco extendida (EDOF).

35 El elemento óptico 12B está configurado según los parámetros de la lente 12A, es decir, su abertura efectiva y opcionalmente también la distancia focal y/o la distribución de potencia óptica. El elemento óptico 12B está configurado como máscara que afecta a la fase, no difractiva. Preferiblemente, tal como se muestra en el presente ejemplo, la máscara 12B se implementa solidaria con la lente, concretamente como un patrón en la superficie de la lente.

40 Generalmente, la máscara 12B puede ser un elemento independiente unido a la lente o ubicado próximo a la misma. Esto se ilustra en la figura 1B que muestra un sistema de formación de imagen 100 que utiliza una disposición de lentes 112 que incluye una lente 12A y un elemento óptico que afecta a la fase, no difractivo 12B ubicado próximo a la lente delante de la misma.

45 La figura 1C muestra esquemáticamente un sistema de formación de imagen 200 según aún otro ejemplo de la invención. En este caso, una disposición de lentes de formación de imagen 212 incluye una disposición de lentes 12A, formada por cuatro de tales lentes L_1 , L_2 , L_3 y L_4 en el presente ejemplo, y una disposición 12B de elementos ópticos OE_1 , OE_2 , OE_3 y OE_4 asociados cada uno con una lente correspondiente de la disposición de lentillas.

50 Tal sistema 200 puede utilizarse, por ejemplo, con un panel de visualización o pantalla 13 (que constituye un objeto) dirigido a facilitar la formación de imagen del elemento de visualización/pantalla (por ejemplo, de un dispositivo de teléfono móvil) para personas que presentan problemas de visión de cerca. La disposición de formación de imagen 212 está albergada a pequeña distancia (unos cuantos milímetros de una superficie 13' del panel de visualización 13. Además, en el presente ejemplo la disposición de elementos ópticos 12B está ubicada aguas abajo de la disposición de lentillas 12A con respecto a la propagación de la luz desde el objeto 13 hacia un detector de luz 16 (ojo del paciente). La utilización de tales disposiciones de lentillas y de elementos de EDOF proporciona que se lleve el plano de enfoque FP más próximo de la disposición de formación de imagen 212 tan cerca como sea posible del plano del objeto 13, de modo que personas con problemas de visión de cerca así como personas con visión normal puedan ver la pantalla. Además, acercando el plano de enfoque más próximo al plano del objeto se reduce la razón de desmagnificación del objeto que va a enfocarse.

55 Preferiblemente, el elemento óptico 12B está configurado como máscara binaria pura de fase. Sin embargo, debe observarse que generalmente el elemento 12B puede estar configurado como máscara de fase y de amplitud.

El elemento óptico 12B está configurado para definir por lo menos una región de transición de frecuencia espacialmente baja, y, junto con las regiones de la lente 12A, define un patrón predeterminado de características ópticamente transparentes sustancialmente separadas que afectan de diferente manera a la fase de la luz que pasa a su través. Por tanto, el patrón está formado por una o más regiones de transición del elemento óptico, espaciadas por las regiones de la lente, en el plano de la lente de formación de imagen. Las regiones de transición son transiciones de fase pi para una determinada longitud de onda, para la que está diseñada la máscara 12B. La disposición de las regiones de transición (posiciones dentro del plano de la lente 12A) está determinada por la abertura efectiva de la lente de formación de imagen 12A dada (y posiblemente también por la potencia óptica de la lente) para maximizar la OTF desenfocada de toda la disposición de formación de imagen. Para ello, el patrón es tal como para generar una relación de interferencia de fase apropiada entre partes de luz que pasan a través de diferentes regiones de la disposición de lentes para permitir de ese modo la reducción de un factor de fase cuadrático que resulta de la luz que se desenfoca con respecto a la lente de formación de imagen.

Tal como se muestra en las figuras 1D y 1E, el elemento óptico puede implementarse como un relieve superficial en la lente de formación de imagen (figura 1D), concretamente, un patrón de regiones separadas R_1 y R_2 de grosor de lente variable; o como un patrón de regiones de lente R'_1 y R'_2 que se compone de materiales con índices de refracción n_1 y n_2 diferentes (figura 1E). En el caso de materiales con índices de refracción diferentes, un determinado material ópticamente transparente de un índice de refracción diferente del de la lente puede recubrirse sobre regiones separadas selectivas de la superficie de la lente.

Las figuras 2A a 2C muestran dos detalles, respectivamente, del contorno del elemento óptico 12B. En el ejemplo de la figura 2A, que no forma parte de la invención reivindicada, la máscara 20 12B está diseñada como una región de transición anular 14 (generalmente, por lo menos una de tales regiones; también puede utilizarse una disposición de anillos concéntricos). En la figura 2B según la invención, la máscara está diseñada como una retícula formada por dos pares perpendiculares entre sí de barras (líneas) $B_1-B'_1$ y $B_2-B'_2$. En la figura 2C según la invención, el elemento 12B es una máscara formada por una disposición bidimensional de elementos de retícula básicos BE. Por ejemplo, las regiones de transición a lo largo de la línea divisoria son transiciones de fase pi y las regiones de intersección entre las barras perpendiculares son transiciones de fase cero. El contorno optimizado para el elemento óptico se obtiene resolviendo un algoritmo, que se describirá adicionalmente a continuación.

Debe observarse que la máscara (patrón) puede ser y puede no ser simétrica con respecto al centro de la lente. En una disposición de este tipo, por ejemplo, las cuatro barras de fase π , dos barras verticales (a lo largo del eje Y) y dos horizontales (a lo largo del eje X), que se ilustran en la figura 2A, pueden desplazarse transversalmente a lo largo de del plano x-y para no estar centradas alrededor del centro de la lente.

También debe observarse, aunque no se muestra específicamente, que el patrón puede estar configurado para definir microestructuras en el interior de la región de transición de fase (por ejemplo, en el interior del anillo de transición de fase pi de la figura 2A), concretamente, cada región de transición de fase puede ser de una frecuencia espacialmente baja variable de transición de fase tal como por ejemplo $\pi/2$, π ,

La presente invención proporciona el elemento de EDOF 12B en forma de una máscara de N segmentos dentro de la abertura efectiva de la lente de formación de imagen 12A. Debe entenderse que en vez de presentar una máscara que bloquea energía en algunos de los segmentos y la transmite en los demás, la invención proporciona la máscara sustancialmente pura de fase, no difractiva 12B, que es o bien 1 o bien (-1) dependiendo del segmento.

Tal como se indicó anteriormente, la máscara 12B está diseñada para maximizar la OTF desenfocada del sistema de formación de imagen, generando invariancia para el factor de fase cuadrático (factor que se genera cuando la imagen está desenfocada y multiplica la CTF de la lente de formación de imagen). Para ello, con el fin de diseñar de manera óptima la máscara 12B, se realiza una búsqueda para los segmentos que obtendrán el valor de transmisión de (-1) de tal manera que la OTF, debido a la distorsión de desenfoque, se delimita tan lejos como sea posible de cero. Puesto que la máscara 12B es una máscara de fase binaria, no se utiliza la consideración de eficiencia energética (la transmisión es del 100%). Siguiendo estos criterios, se realiza una búsqueda por todas las posibilidades y combinaciones para la máscara de codificación de abertura. La distorsión de desenfoque se modela multiplicando la abertura por la siguiente expresión:

$$\tilde{D}(v) = \exp\left(\frac{i4\Psi v^2}{D^2}\right) \quad (1)$$

en la que $\tilde{D}(v)$ es la CTF de la lente de formación de imagen 12A correspondiente a la posición de desenfoque del objeto del que se forma una imagen, D es el diámetro de la lente de formación de imagen 12A (generalmente,

la abertura efectiva de la lente), ν es la coordenada de la abertura de la lente (en el plano de CTF), y Ψ es el factor de fase que representa la cantidad que se desenfoca:

$$\Psi = \frac{\pi D^2}{4\lambda} \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{\nu} - \frac{1}{F} \right) \quad (2)$$

donde λ es la longitud de onda, u es la distancia entre la lente de formación de imagen 12A y el objeto 13, ν es la distancia entre la lente de formación de imagen 12A y el sensor 16 (detector), y F es la distancia focal de la lente de formación de imagen. Debe observarse que el término "lente de formación de imagen" se refiere en este caso a la abertura efectiva de la misma.

Cuando se satisface la condición de formación de imagen:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{\nu} = \frac{1}{F} \quad (3)$$

el factor de distorsión de fase ψ es igual a cero.

Se calcula la OTF mediante autocorrelación de la CTF consigo misma:

$$\text{OTF}(\nu) = \text{CTF}(\nu) \otimes \text{CTF}(\nu) \quad (4)$$

La operación de autocorrelación consiste en desplazar dos funciones CTF en sentidos opuestos, respectivamente, y luego multiplicar y sumar el resultado. La OTF así obtenida se refiere a una frecuencia espacial que corresponde a la cantidad de desplazamiento. A altas frecuencias (grandes desplazamientos), la multiplicación y la suma se promedian a cero en el caso de desenfoque. Así, la OTF no transmite altas frecuencias cuando la imagen está desenfocada.

La máscara de fase de la presente invención tiene como objetivo la reducción 20 de la cancelación de alta frecuencia a grandes desplazamientos de la CTF (la OTF es una autocorrelación de la CTF). Para ello, la máscara está configurada para invertir el signo de parte del campo de luz que antes (es decir, lente pura sin corrección de EDOF) se promediaba a cero (y esto es por lo que la OTF no transmitió las altas frecuencias espaciales).

La OTF es la transformada de Fourier de la función de propagación puntual de intensidad, y se utiliza para expresar la función de transmisión de frecuencias espaciales para la intensidad, cuando se aplica iluminación incoherente. Por tanto, la formulación matemática para maximizar la OTF es la siguiente:

$$\max_{a_n} \left\{ \min \left\{ \left[\tilde{D}(\nu) \sum_{n=1}^N a_n \text{rect} \left(\frac{\nu - n\Delta\nu}{\Delta\nu} \right) \right] \otimes \left[\tilde{D}(\nu) \sum_{n=1}^N a_n \text{rect} \left(\frac{\nu - n\Delta\nu}{\Delta\nu} \right) \right] \right\} \right\} \quad (5)$$

es decir, hallar los valores para a_n que proporcionan un máximo para los mínimos de la expresión de autocorrelación expresión donde $a_n = (1, -1)$ (es igual o bien a 1 o bien a -1).

Debe observarse que el algoritmo numérico iterativo descrito anteriormente es un ejemplo específico pero no limitativo de definición de la configuración del elemento de EDOF. Pueden utilizarse también otras técnicas, por ejemplo enfoques numéricos basados en la minimización de la entropía, o probabilidad máxima, u otros enfoques numéricos o analíticos, dando como resultado una profundidad de foco extendida totalmente óptica de frecuencia espacialmente baja.

Las figuras 3A a 3D ilustran el efecto de la presente invención. Se obtienen tres ejemplos de valor absoluto de la OTF (denominada función de transferencia de modulación, MTF (*modulation transfer function*)) para diferentes valores de factor de fase: $\psi = 1,6$ en la figura 3A; $\psi = 4,8$ en la figura 3B; $\psi = 9,8$ en la figura 3C y $\psi = 12,8$ en la figura 3D. En cada una de las figuras, la curva C_1 corresponde a la MTF mientras que el estado de enfoque, la curva C_2 corresponde a la MTF desenfocada de un sistema de formación de imagen sin la utilización del elemento óptico de corrección (elemento de EDOF) de la presente invención (máscara 12B en la figura 1), y la curva C_3 corresponde a la MTF desenfocada del sistema con el elemento de corrección.

La invariancia transversal puede obtenerse utilizando el elemento de fase que produce la replicación periódica de la forma de fase, concretamente replicación lateral de la forma de fase. Volviendo a la figura 2C que ejemplifica una máscara formada por una disposición bidimensional de elementos básicos BE, cuando los grandes desplazamientos laterales (altas frecuencias) excluyen parte de la forma de fase, se inserta una parte

complementaria de otro periodo espacial de la máscara produciéndose por tanto el periodo de fase mediante replicación. La replicación del periodo básico de las transiciones (el del elemento básico BE) reduce por tanto la sensibilidad a desplazamientos laterales. La invariancia longitudinal se obtiene de la siguiente manera: dada la distancia longitudinal entre el elemento de fase y un sensor (el plano de la lente de formación de imagen o el plano de la abertura efectiva), que es el cristalino del ojo humano en caso de aplicaciones oftálmicas, se considera la propagación en el espacio libre de la función de máscara para esta distancia. El resultado es una distribución de fase y amplitud. No se considera la amplitud, dejando solo el perfil de fase. En muchos casos, la binarización de la función de fase puede proporcionar también resultados suficientemente buenos. La binarización produce una máscara espacial que es más fácil de fabricar.

Se hace referencia a las figuras 4A a 4I y las figuras 5A a 5I que ilustran qué aspecto presenta una imagen facial cuando se varía el parámetro de desenfoque $4\psi/D^2$ entre -0,2 (figuras 4A y 5A) y 0,2 (figuras 4I y 5I) en escalones de 0,05. Las figuras 4A a 4I muestran el caso en el que se utiliza la máscara (diseñada de manera óptima) de la presente invención, y las figuras 5A a 5I muestran el caso en el que no se utiliza tal máscara de codificación de abertura. En el presente ejemplo, se utilizó el elemento de EDOF configurado de manera similar al de la figura 2B. Tal como puede observarse claramente en las figuras, existe una diferencia en las distorsiones entre imágenes de las figuras 4A a 4I y 5A a 5I debido a la máscara de codificación de abertura de la presente invención.

La figura 6 muestra los resultados de examen de la sensibilidad de la máscara de codificación (elemento de EDOF) de la presente invención con variaciones de la longitud de onda. En el presente ejemplo, se iluminó una disposición de lentes de formación de imagen (lente de formación de imagen con una máscara de codificación) con la longitud de onda $\lambda_1 = 0,8\lambda_0$, donde λ_0 es la longitud de onda para la que se diseñó y se fabricó la máscara para presentar transición/transiciones de fase pi, y se utilizó el parámetro de desenfoque de $4\psi/D^2 = 0,15$. Tal como pudo observarse, la distorsión de desenfoque obtenido debida a la utilización de la máscara es todavía muy baja a pesar del hecho de que la máscara ya no está optimizada (puesto que las características del patrón de máscara son transiciones de fase pi para λ_0 y no para λ_1).

Las figuras 7A a 7D muestran otros resultados experimentales obtenidos para formar una imagen de una roseta. En este caso, la figura 7A muestra una imagen correspondiente a la posición de enfoque de la roseta obtenida sin un elemento de EDOF de la invención; la figura 7B muestra una imagen enfocada obtenida con un elemento de EDOF configurado de manera similar al de la figura 2A; la figura 7C corresponde a la posición de desenfoque de la roseta sin un elemento de EDOF; y la figura 7D muestra una imagen de la roseta de desenfoque obtenida con un elemento de EDOF configurado de manera similar al de la figura 2A. Tal como se muestra, la utilización del elemento de EDOF configurado de manera similar al de la figura 2A proporciona una mejora de las altas frecuencias espaciales y el efecto sobre la entrada cuando el sistema está enfocado.

Debe observarse que en todas las imágenes presentadas en las figuras 4A a 4I, 5A a 5I, 6 y 7A a 7D, que muestran una extensión suficiente de la profundidad de foco, no se aplicó un procesamiento digital posterior. La aplicación de tal procesamiento podría mejorar adicionalmente los resultados obtenidos.

El inventor ha realizado una verificación experimental del enfoque de profundidad de foco extendida para iluminación no coherente espacialmente policromática (iluminación general). Las condiciones experimentales fueron las siguientes: la distancia focal de la lente de formación de imagen $F = 90$ mm, la distancia entre la lente de formación de imagen y el objeto $v = 215,9$ mm, la distancia entre la lente de formación de imagen y el detector (CCD) $u = 154,3$ mm, la abertura de la lente de formación de imagen $D = 16$ mm. Por tanto, la medición para la distorsión de fase ψ es igual a 13 para el caso en el que el objeto se mueve una distancia de 1,5 mm desde el plano de enfoque, y $\psi = 17$ para mover el objeto una distancia de 2 mm. Se calcula el valor del factor de fase ψ siguiendo la ecuación 2 anterior y utilizando las distancias y el diámetro de la lente (abertura efectiva de la lente) en el sistema óptico. Se muestran los resultados experimentales en estas condiciones en las figuras 8A a 8D y las figuras 9A a 9H. En el presente ejemplo, se utilizó el elemento de EDOF configurado de manera similar al de la figura 2A.

En este caso, la figura 8A corresponde a una posición de enfoque sin la utilización del elemento óptico configurado de manera similar al de la figura 2A; la figura 8B corresponde al enfoque con tal elemento, la figura 8C corresponde a la posición desenfocada sin el elemento óptico a $\psi = 13$ (+ 1,5 mm), y la figura 8D corresponde a la posición desenfocada con el elemento óptico a $\psi = 13$ (+ 1,5 mm).

La figura 9A muestra una imagen enfocada obtenida sin el elemento óptico; la figura 9B muestra la imagen desenfocada a $\psi = 13$ (+1,5 mm) sin el elemento; la figura 9C muestra la imagen desenfocada a $\psi = 17$ (+2 mm) sin el elemento; las figuras 9D a 9F corresponden a las figuras 9A a 9C pero con el elemento óptico. La figura 9G muestra la imagen desenfocada a $\psi = 13$ (+1,5 mm) obtenida sin el elemento con la iluminación policromática; la figura 9H muestra la imagen desenfocada a $\psi = 13$ (+1,5 mm) obtenida con el elemento óptico para la iluminación policromática.

Tal como se indicó anteriormente, la disposición de lentes de formación de imagen de la presente invención puede utilizarse para aplicaciones oftálmicas. Con el fin de permitir la inserción de la disposición de lentes de formación de imagen en el ojo, la superficie de la disposición de lentes ha de ser plana. Las técnicas de fabricación adecuadas para fabricar una disposición de lentes de formación de imagen de este tipo (es decir, lente de formación de imagen con patrón plano) incluyen, por ejemplo, grabado (en húmedo o en seco) o perforación con láser o rectificación con torno para obtener la estructura espacial deseada (superficie relieve), y luego llenar el volumen evacuado mediante un material de un índice de refracción diferente del de la lente, siempre que la diferencia de índice de refracción sea tal que la región exterior de la máscara sea plana mientras que se genera la diferencia de fase deseada, requerida como región de fase de amortiguación que genera una igualación apropiada entre las regiones de la abertura de lente para el efecto de interferencia. Otra realización podría ser mediante difusión o fotopolimerización que no incluye desarrollar o retirar el material polimerizado. Aún otro enfoque que se refiere a cirugía ocular podría ser implantando tejido artificial que presenta una diferencia en el índice de refracción en comparación con el tejido ocular existente. El elemento de EDOF de la presente invención (que no presenta potencia óptica) se añade a la potencia focal de una determinada lente que va a obtenerse. Por ejemplo, si un paciente necesita gafas de -1 dioptría y gafas de 3 dioptrías para la visión de cerca y de lejos, el elemento de EDOF de la presente invención puede diseñarse apropiadamente para utilizarse en una cualquiera de las gafas, que está configurado según la abertura de lente respectiva para permitir una región de profundidad de foco equivalente a 5 dioptrías. En realidad, en este ejemplo específico, pueden utilizarse gafas de 1 dioptría con el elemento de EDOF de la presente invención, funcionando el elemento de EDOF alrededor de la potencia óptica de la lente (1 dioptría) y proporciona a la región de profundidad de campo desde -1,5 hasta 3,5 dioptrías. Así, el paciente puede utilizar solo un par de gafas con 1 dioptría. Esta potencia focal de las gafas (lente de formación de imagen) se añadirá al elemento de EDOF. Un elemento de EDOF de este tipo maximiza la OTF desenfozada de la disposición de lentes (modula apropiadamente el perfil de CTF de la lente de formación de imagen de las gafas respectivas) generando una relación de interferencia de fase apropiada entre partes de luz que pasan a través de diferentes regiones de la lente, para reducir un factor de fase cuadrático que resulta de la luz que se desenfoca con respecto a la lente de formación de imagen. El inventor ha hallado que para la mayoría de los pacientes puede utilizarse una configuración de elemento de EDOF común, preferiblemente como la de la figura 2C. Volviendo a la figura 2C, el periodo básico (del elemento básico BE) es de aproximadamente 3 mm, la distancia entre dos barras adyacentes es de aproximadamente 1,875 mm, y el grosor de barra es de aproximadamente 0,375 mm.

Si se utiliza el elemento de EDOF con su alcance de profundidad de foco encima de una lente en aplicaciones oftálmicas, tales como una lente de contacto, entonces puede traducirse al intervalo de dioptrías. El diámetro de la lente ocular (abertura efectiva de la lente de formación de imagen) varía entre 2 mm y 6-7 mm dependiendo de las condiciones de iluminación. El elemento óptico genera un intervalo de dioptrías dentro del cual la imagen está enfocada. El inventor ha hallado que para el intervalo resultante del factor de fase ψ (aproximadamente hasta 17) para un entorno iluminado en el que el pupila del ojo presenta un diámetro de 2 mm, el intervalo de dioptrías obtenido P es de más de 5 (desde -2,5 hasta 2,5). Las simulaciones siguieron la fórmula:

$$P = \frac{4\Psi\lambda}{\pi D^2} \quad (6)$$

Las figuras 10A a 10B presentan los resultados de simulación que visualizan el rendimiento de la aplicación de profundidad de foco oftálmica de la presente invención. La simulación de la figura 10A corresponde al intervalo de dioptrías global obtenido debido al hecho de que el elemento de EDOF está unido a una lente de contacto. El diámetro de la lente ocular varía entre 2 mm y 6-7 mm dependiendo de las condiciones de iluminación. Las simulaciones siguen la ecuación 6 anterior.

En la simulación de la figura 10B, se utiliza una lente de formación de imagen con una distancia focal fija. Si la distancia entre la lente y sensor es igual a la distancia focal ($v = F$) entonces la imagen estará enfocada partiendo de una determinada distancia, u_{\min} , hasta infinito, donde la distancia u_{\min} se determina como:

$$u_{\min} = \frac{1}{\frac{4\lambda\Psi}{\pi D^2} + \frac{1}{F} - \frac{1}{v}} = \frac{\pi D^2}{4\lambda\Psi} \quad (7)$$

y para $v = F$ se obtiene:

$$u_{\min} = \frac{\pi D^2}{4\lambda\Psi} \quad (8)$$

Se representa gráficamente el diagrama para u_{\min} con y sin el elemento de EDOF de la presente invención en la figura 10B. Tal como pudo observarse, la distancia mínima es mucho menor cuando se utiliza el elemento de la

invención. Por tanto, el intervalo de enfoque global es mucho mayor. Debe observarse que para el ojo humano, $v = 15 \text{ mm}$.

5 Volviendo a la figura 1C que ejemplifica una disposición de formación de imagen de la presente invención formada por un disposición de lentes y una disposición de elementos de EDOF (adecuada para utilizarse con un panel de visualización o pantalla), pueden estimarse los parámetros requeridos de la disposición de formación de imagen de la siguiente manera:

10 Supongamos que u , que es la distancia entre la pantalla 13 y la disposición de lentes 12A es de aproximadamente 2 mm; v , que es la distancia entre la pantalla 13 y el plano de foco FP más próximo es de 40 cm; y R , que es la distancia entre el ojo 16 y el plano de foco FP más próximo, es de aproximadamente 1 m. El objeto 13 está constituido por la visualización del teléfono móvil o la pantalla. Básicamente, la disposición de lentes 12A produce imágenes del objeto plano 13 en el plano de foco FP más próximo, es decir:

$$\frac{1}{u} - \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{uv}{v - u}$$

15

Lo que proporciona $f = 2,01 \text{ mm}$.

20

El parámetro de desenfoque se define como:

$$\Psi = \frac{\pi D^2}{4\lambda} \left| \frac{1}{u} - \frac{1}{v} - \frac{1}{f} \right|$$

donde λ es la longitud de onda.

25 Con la utilización de EDOF, este parámetro puede alcanzar el valor de 15 y sin el elemento de EDOF, el valor de 2-3 sin distorsionar la calidad de imagen. Puede hallarse el diámetro, D , de las lentes en la disposición de lentes de tal manera que el valor mínimo para la distancia entre la pantalla 13 y el plano de foco FP más próximo, ($v_{\text{mín}}$), será muy próxima al objeto plano 13 para presentar una desmagnificación mínima. El factor de desmagnificación es:

30

$$M_T = \frac{v_{\text{mín}}}{u}$$

Para presentar $v_{\text{mín}} = u = 2 \text{ mm}$, se necesita:

35

$$D = \sqrt{\frac{\Psi \lambda f}{\pi}}$$

Esto produce:

$$D = \sqrt{\frac{15 \cdot 0,5 \mu\text{m} \cdot 2,01 \text{ mm}}{\pi}} = 70 \mu\text{m}$$

40

Debe observarse que sin el elemento de EDOF la distancia mínima v habría sido:

$$v_{\text{mín}} = \frac{1}{\frac{1}{u} - \frac{1}{f} - \frac{\Psi_{\text{máx}} \lambda}{\pi D^2}} = \frac{1}{\frac{1}{2 \text{ mm}} - \frac{1}{2,01 \text{ mm}} - \frac{2 \cdot 0,5 \mu\text{m}}{\pi \cdot (70 \mu\text{m})^2}} = 16 \text{ mm}$$

45 lo que significa un factor de desmagnificación de 8 (16 mm/2 mm). Tal desmagnificación no habría permitido ver los caracteres en la visualización.

La unión de la disposición de lentillas 12A a la pantalla disminuyó la resolución visible. La resolución de un sistema de formación de imagen de este tipo está limitada por el factor de:

$$\delta_x = 1,22 \cdot \lambda \frac{f}{D} = 1,22 \cdot 0,5 \mu\text{m} \frac{2,01 \text{ mm}}{70 \mu\text{m}} = 17,5 \text{ mm}$$

5

Puesto que los detalles que aparecen en la pantalla son mayores que eso, no se ve dañada la resolución por la disposición de lentillas de formación de imagen.

10

Siguiendo los cálculos presentados anteriormente, una persona con visión normal que enfocará sus ojos en la pantalla (o en un plano situado a 2 mm tras la misma) también verá la imagen enfocada.

15

La técnica de la presente invención podría romper barreras en una amplia serie de aplicaciones incluyendo, pero sin limitarse a, las siguientes: dispositivos de oficina convencionales que contienen una cámara tal como videocámaras, escáneres (por ejemplo, escáneres de códigos de barras) y cámaras web; sistemas convencional de formación de imagen incluyendo cámaras y detectores, es decir cámaras celulares, cámaras de coches, cámaras de vigilancia, visión artificial, fotografía, HDTV, videoconferencias, sistemas de formación de imagen de radar (que presentan normalmente problemas de desenfoque), endoscopia e inspecciones biomédicas pasivas, tomografía, paneles de visualización, etc. La utilización del elemento de extensión de profundidad de foco de la presente invención en endoscopia e inspecciones biomédicas pasivas permite la formación de imagen en el

20

cuerpo para ver órganos enfocados que no lo estarían si no, puesto que no hay control sobre la posición exacta del aparato médico. Algunas otras posibles aplicaciones de la presente invención incluyen corregir aberraciones cromáticas en diversos sistemas ópticos, por ejemplo en comunicación óptica; lectores/escriores de contenido multimedia utilizados con soportes de información tales como DVD convencional, o soportes de información multicapa que utilizan reflexión de luz o fluorescencia.

25

La presente invención también puede utilizarse en aplicaciones oftálmicas como lente de contacto, lente de gafas, lente intraocular, o cualquier otra lente utilizada alrededor de o insertada en cualquier parte del ojo. Un ejemplo obvio es la utilización de la invención para el beneficio de personas cortas de vista (miopes) que desarrollan presbicia, la necesidad de gafas de lectura como resultado de cambios asociados a la edad en su cristalino natural. En tal aplicación, esas personas pueden utilizar una lente individual, como lente de gafas, lente de contacto, lente intracorneal, lente intraocular fáquica o lente intraocular afáquica, o una lente insertada en otro lugar en el ojo. De este modo, utilizarán una lente para ver a cualquier distancia, de cerca o de lejos. Otra utilización obvia de la invención es en una lente intraocular, la lente artificial implantada en el ojo después de la extracción de cataratas. Actualmente, la lente artificial regular presenta solo un único foco y, por tanto, la persona en cuyo ojo se implantó la lente presenta una profundidad de foco muy limitada y ha de utilizar gafas para la mayoría de distancias en consideración. La incorporación de la invención en la lente implantada proporcionará la visión enfocada del paciente en todas las distancias. Otro ejemplo de utilización oftálmica es como reemplazo de lentes de gafas multifocales (progresivas), que están diseñadas convencionalmente de tal manera que cada segmento de la superficie de la lente presenta un foco diferente y, por tanto, el paciente ha de mover sus ojos para enfocar objetos a diferentes distancias. La incorporación de la invención en unas gafas o lente de contacto permitirá al usuario con presbicia ver objetos enfocados a todas las distancias a través de cualquier parte de la lente.

30

35

40

45

En todas las aplicaciones de la invención, incluyendo los ejemplos anteriores, la imagen de objetos a diferentes distancias se enfocan en la retina (o sensor) sin una pérdida apreciable de energía, en contraposición a la situación en lentes de contacto o intraoculares multifocales.

50

Los expertos en la materia apreciarán fácilmente que pueden aplicarse diversas modificaciones y cambios a las realizaciones de la invención descritas anteriormente en la presente memoria sin apartarse de su alcance definido por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Disposición de formación de imagen para proporcionar una profundidad de foco extendida de la disposición de formación de imagen y que comprende un conjunto de lentes de formación de imagen (12) que incluye:
- 5 por lo menos una lente oftálmica (12A) para formar una imagen de luz visible en el ojo de un paciente, y por lo menos un elemento óptico (12B) asociado con dicha por lo menos una lente (12A),
- 10 definiendo el elemento óptico (12B) junto con su lente asociada (12A) un patrón predeterminado formado por unas regiones de transición de fase ópticamente transparentes del elemento óptico (12B) espaciadas por las regiones de la lente (12A) en el plano de la lente de formación de imagen, siendo el elemento óptico (12B) una máscara formada por una disposición bidimensional de unos elementos de retícula perpendiculares entre sí ($B_1-B'_1$, $B_2-B'_2$, BE) que forman las regiones de transición de fase, afectando de diferente manera las
- 15 regiones de transición de fase y las regiones de la lente a la fase de luz visible que pasa a través del conjunto de lentes de formación de imagen (12), siendo dichas regiones de transición de fase a lo largo de las líneas divisorias de dicha máscara unas transiciones de fase pi y siendo las regiones de intersección entre dichas líneas divisorias unas transiciones de fase cero para una longitud de onda de luz ambiental para la que está diseñado el elemento óptico, siendo la frecuencia espacial de la máscara formada por la disposición
- 20 bidimensional de elementos de retícula ($B_1-B'_1$, $B_2-B'_2$, BE) del elemento óptico (12B) tal que el elemento óptico (12B) sea sustancialmente no difractivo con respecto a la longitud de onda de luz visible que pasa a través del conjunto de lentes de formación de imagen (12), estando el elemento óptico (12B) configurado para no añadir potencia óptica a la lente asociada (12A).
- 25 2. Disposición según la reivindicación 1, en la que dicho elemento óptico está configurado para proporcionar a la disposición de formación de imagen la profundidad de foco extendida con luz incoherente.
3. Disposición según la reivindicación 1 o 2, que está configurada para su inserción en el ojo, siendo una superficie de la disposición sustancialmente plana.
- 30 4. Disposición según la reivindicación 1, en la que dicho conjunto de lentes incluye una lente individual asociada con un único elemento óptico.
5. Disposición según la reivindicación 1, en la que el conjunto de lentes comprende una disposición de lentes, y la disposición comprende una disposición de los elementos ópticos, estando cada elemento óptico asociado con una lente correspondiente de las lentes.
- 35 6. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que dicho elemento óptico está configurado como un elemento puro de fase.
- 40 7. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que dicho elemento óptico está configurado como una máscara binaria.
8. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en la que dicho elemento óptico está configurado como un elemento que afecta a la fase y a la amplitud.
- 45 9. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el elemento óptico está configurado para maximizar una función de transferencia óptica (OTF) desenfocada.
- 50 10. Disposición según la reivindicación 9, en la que el elemento óptico reduce un factor de fase cuadrático que resulta de la luz que se desenfoca con respecto a la lente de formación de imagen.
11. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la región de transición de fase del elemento óptico aplica un desplazamiento de fase de $\pi/2$ a luz de una determinada longitud de onda para la que está diseñado el elemento óptico en comparación con un efecto de fase de la lente asociada.
- 55 12. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el número y las posiciones de dicha una o más de las regiones de transición de fase dentro del plano de la lente de formación de imagen están determinados por la potencia óptica de la lente de formación de imagen.
- 60 13. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el número y las posiciones de las regiones de transición de fase del elemento óptico dentro del plano de la lente de formación de imagen se seleccionan de tal manera que dicho patrón corresponda a un perfil de fase a_n que proporciona un máximo para los mínimos de autocorrelación de una función de transferencia coherente (CTF) de la lente de formación de imagen.
- 65

14. Disposición según las reivindicaciones 7 y 13, en la que la posición de N regiones que afectan a la fase del elemento óptico dentro del plano de la lente de formación de imagen se determina como:

$$\max_{a_n} \left\{ \min \left\{ \left[\tilde{D}(v) \sum_{n=1}^N a_n \operatorname{rect} \left(\frac{v-n\Delta v}{\Delta v} \right) \right] \otimes \left[\tilde{D}(v) \sum_{n=1}^N a_n \operatorname{rect} \left(\frac{v-n\Delta v}{\Delta v} \right) \right] \right\} \right\}$$

en la que los valores para a_n proporcionan un máximo para los mínimos de la CTF de la lente de formación de imagen, y a_n es igual o bien a 1 o bien a -1, siendo Δv una anchura de las regiones de transición dentro del plano

de la lente de formación de imagen, siendo $\tilde{D}(v)$ la CTF de la lente de formación de imagen correspondiente a la posición de desenfoque de un objeto del que se forma una imagen, y siendo determinada como

$$\tilde{D}(v) = \exp \left(\frac{i4\Psi v^2}{D^2} \right),$$

siendo D la dimensión de abertura efectiva, v es una coordenada de la abertura efectiva en el plano de CTF, y Ψ es un factor de fase que representa el grado en que se desenfoca que se determina como

$$\Psi = \frac{\pi D^2}{4\lambda} \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{v} - \frac{1}{F} \right)$$

siendo u una distancia entre la lente de formación de imagen y un objeto, siendo v la distancia entre la lente de formación de imagen y un detector, siendo λ la longitud de onda, y siendo F la distancia focal de la lente de formación de imagen.

15. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que dicha por lo menos una región de transición de fase presenta un patrón secundario formado por una disposición de subregiones que afectan a la fase variable.

16. Disposición según la reivindicación 1, en la que dicha por lo menos una región de transición de fase π presenta un patrón secundario formado por una disposición de subregiones de transición de fase π variable.

17. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que dicho elemento óptico está separado de la lente de formación de imagen a lo largo de un eje óptico de la lente de formación de imagen.

18. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, en la que dicho elemento óptico está unido a la lente de formación de imagen.

19. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, en la que dicho elemento óptico está formado solidario con la lente de formación de imagen.

20. Disposición según la reivindicación 19, en la que dicho patrón está formado como un relieve superficial en la superficie de la lente de formación de imagen, definiendo un grosor de lente dentro de por lo menos una de las regiones que afectan a la fase diferente del que hay dentro de las otras regiones de la lente.

21. Disposición según la reivindicación 20, en la que dicha por lo menos una región de transición de fase está formada por un material que presenta un índice de refracción diferente del que presenta el material de la lente de formación de imagen.

22. Disposición según la reivindicación 19 o 21, en la que dicho elemento óptico está configurado como una máscara formada por una disposición de las regiones que afectan a la fase, formadas por un material que presenta un índice de refracción diferente del que presenta el material de la lente de formación de imagen.

23. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el elemento óptico está configurado para maximizar la OTF reduciendo la cancelación de alta frecuencia en grandes desplazamientos de una función de transferencia coherente (CTF) de la lente de formación de imagen.

24. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el elemento óptico está configurado para maximizar la OTF reduciendo la sensibilidad de la disposición de lentes a desplazamientos de la función de transferencia coherente (CTF) de la lente de formación de imagen mientras se desenfoca.

25. Disposición según la reivindicación 24, en la que el elemento óptico está configurado para producir la replicación periódica de una forma de fase lateral de un campo de luz que se propaga a través de la lente de

formación de imagen.

5 26. Disposición según la reivindicación 24, en la que el elemento óptico está configurado según una propagación en el espacio libre de la función del elemento óptico para la distancia entre el elemento óptico y el plano de la lente de formación de imagen.

27. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, para su utilización en gafas para pacientes.

10 28. Disposición según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 26, en la que dicha lente de formación de imagen es una lente oftálmica de contacto o lente intraocular.

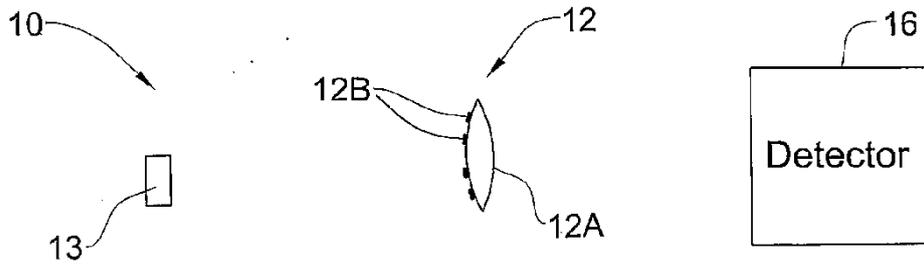


FIG. 1A

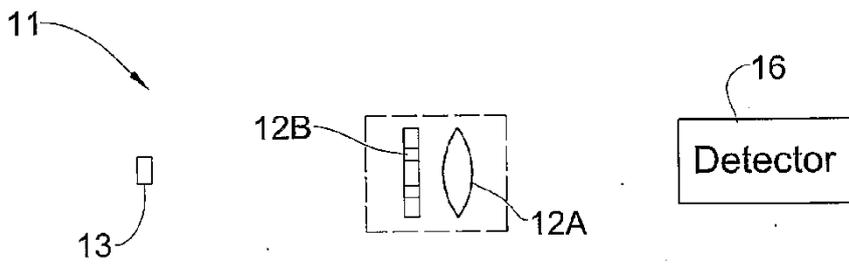


FIG. 1B

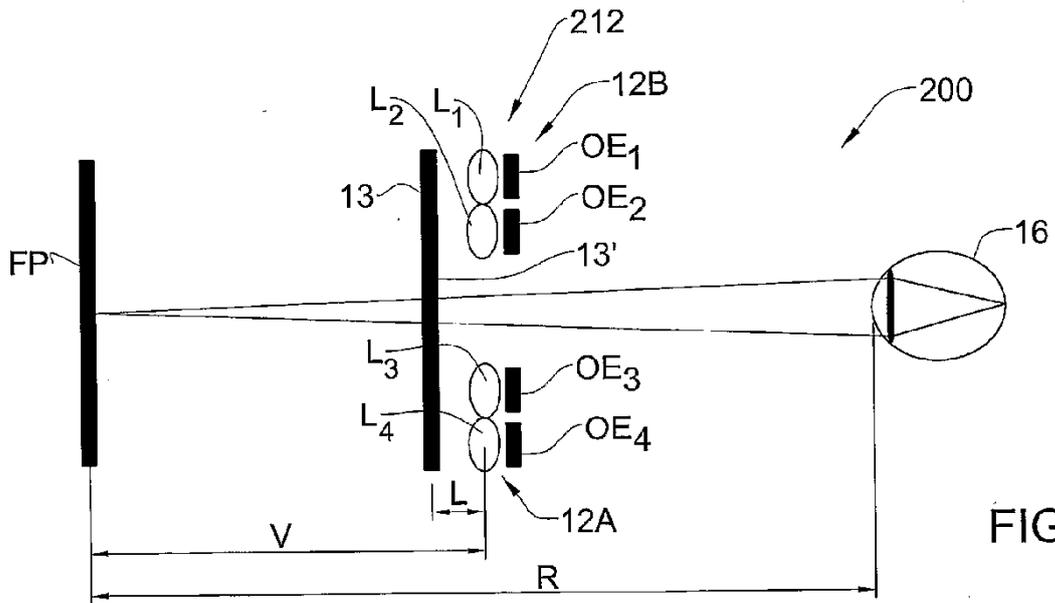


FIG. 1C

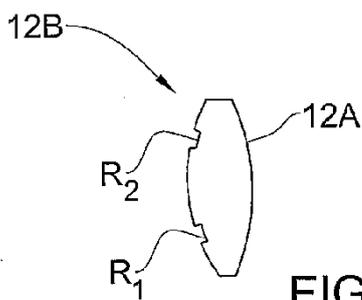


FIG. 1D

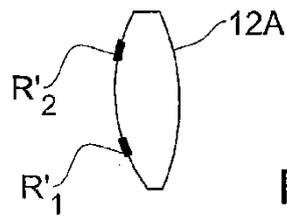


FIG. 1E

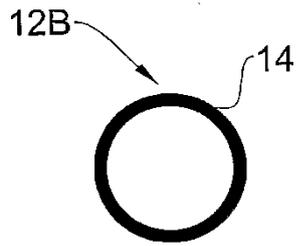


FIG. 2A

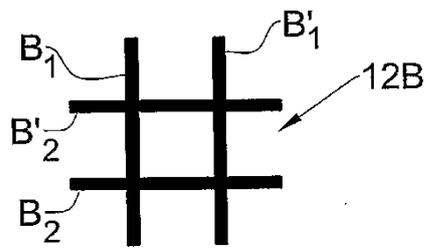


FIG. 2B

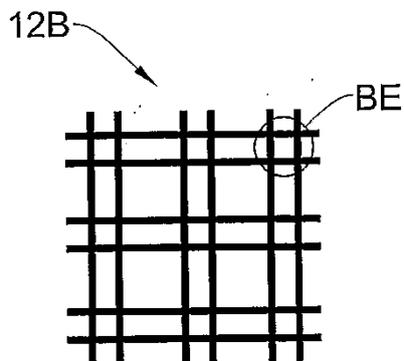


FIG. 2C

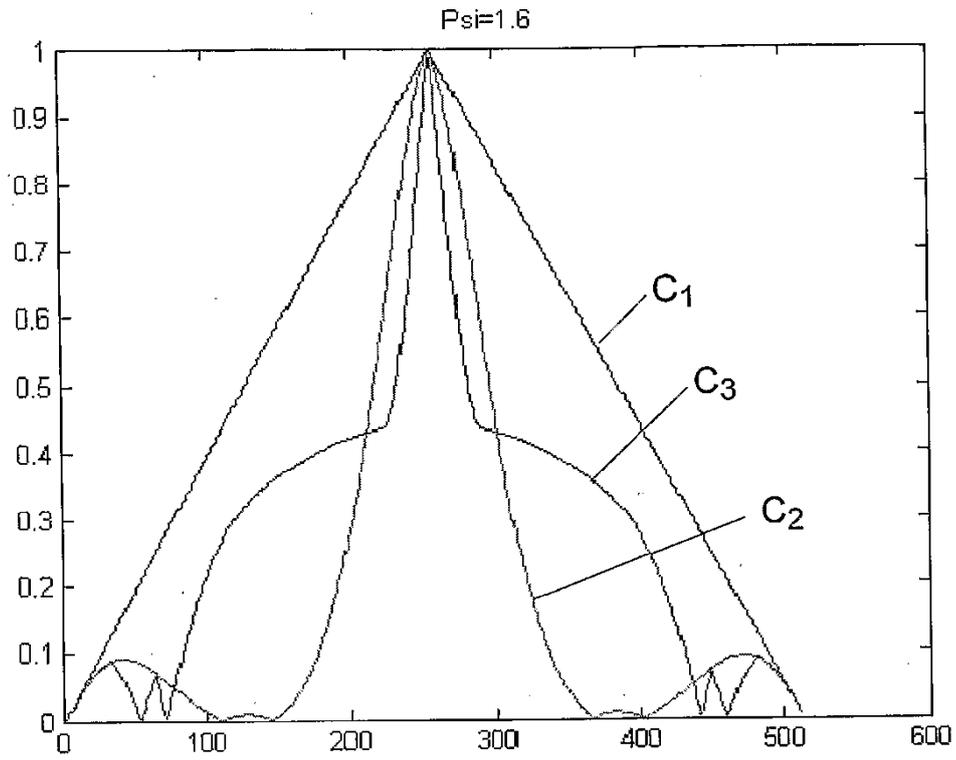


FIG.3A

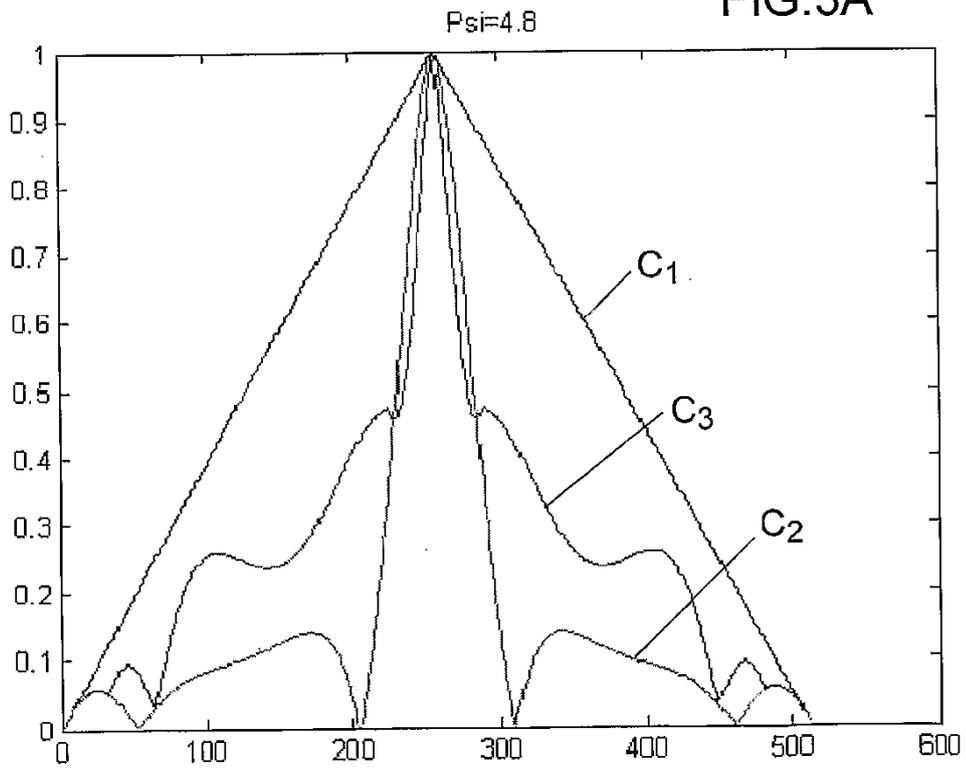


FIG.3B

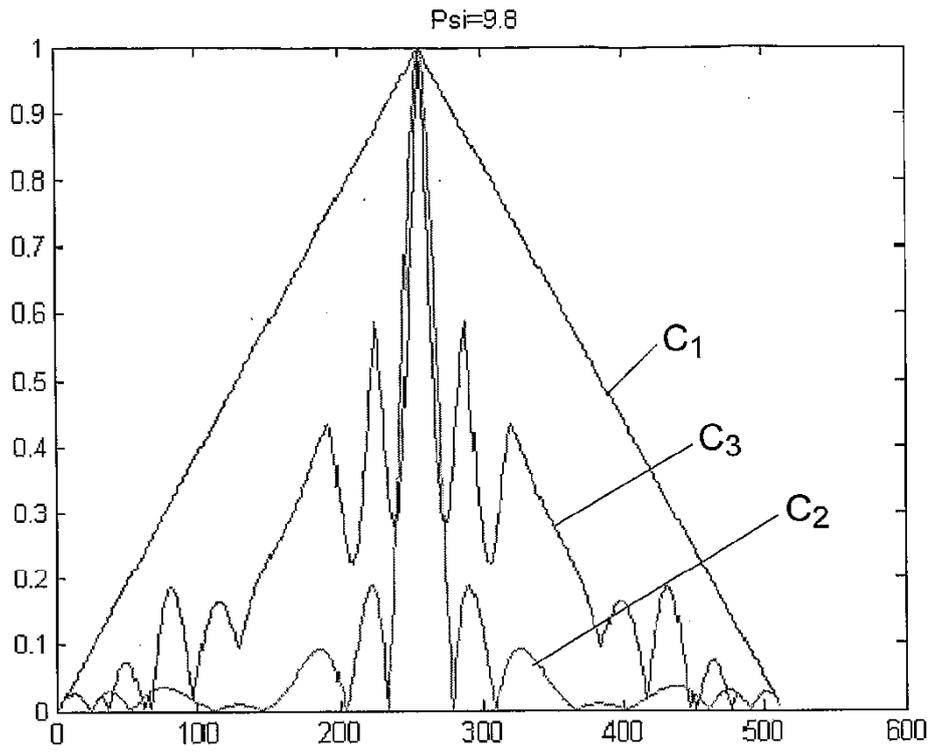


FIG.3C

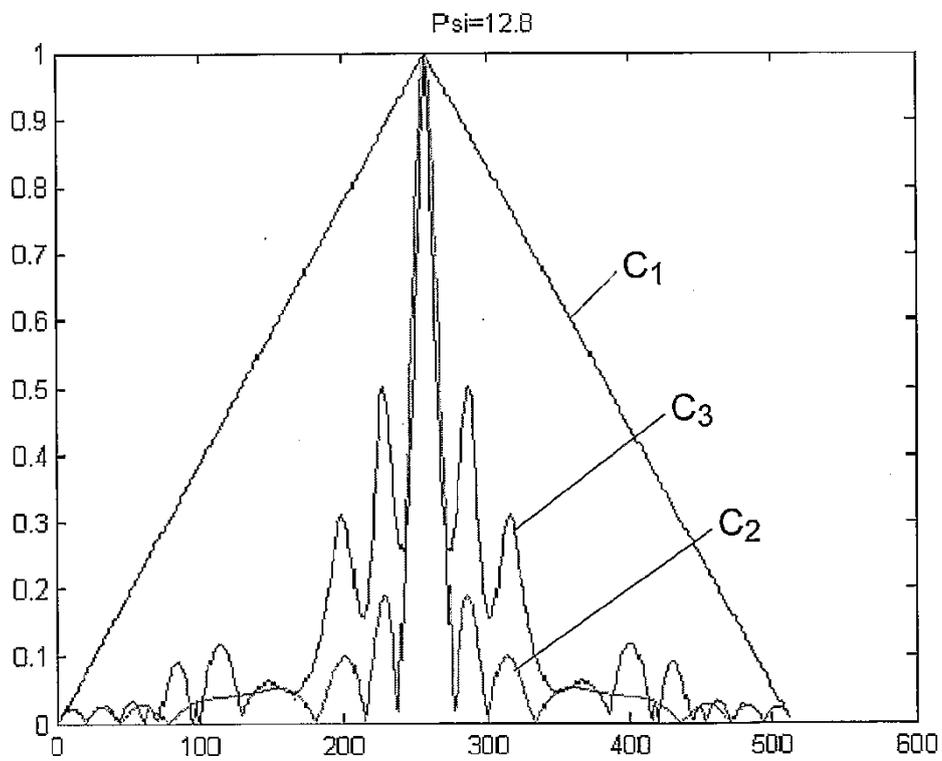


FIG.3D

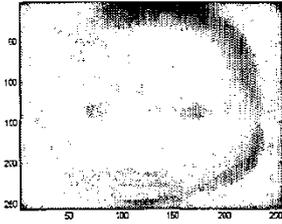


FIG. 4A

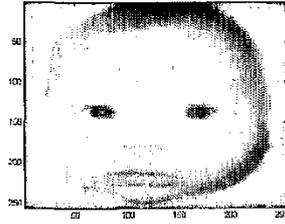


FIG. 4B

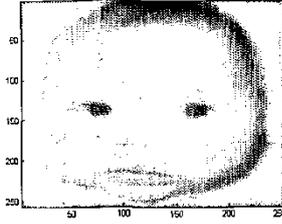


FIG. 4C

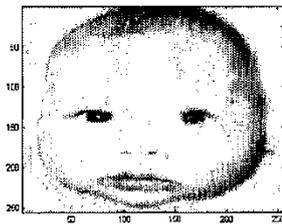


FIG. 4D

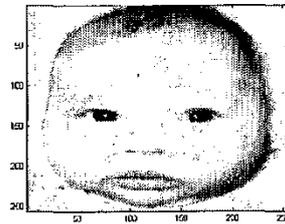


FIG. 4E

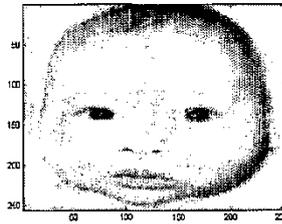


FIG. 4F

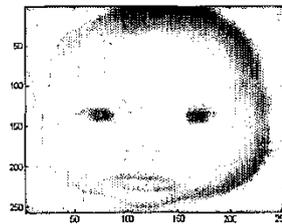


FIG. 4G

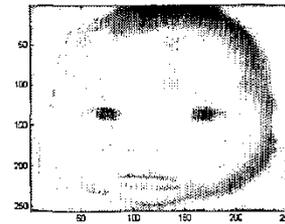


FIG. 4H

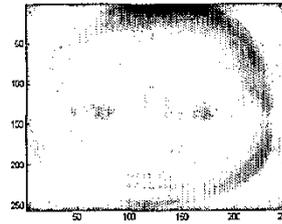


FIG. 4I

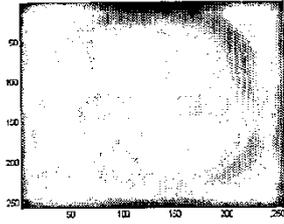


FIG. 5A

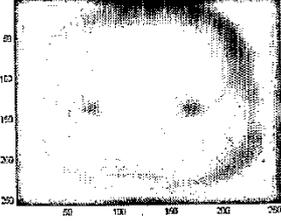


FIG. 5B

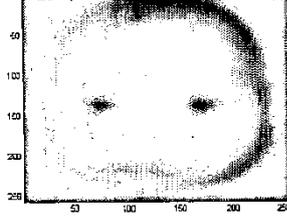


FIG. 5C

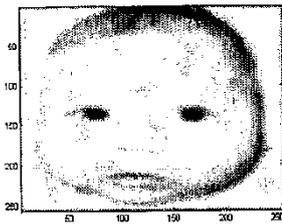


FIG. 5D

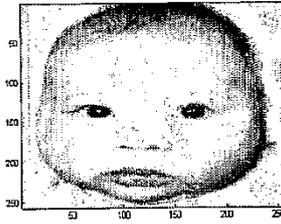


FIG. 5E

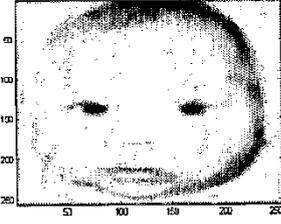


FIG. 5F

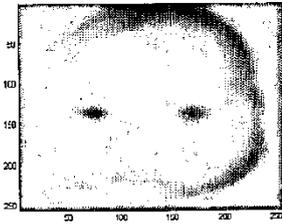


FIG. 5G

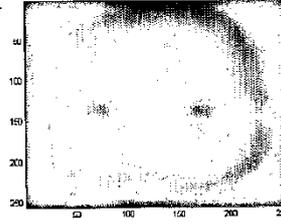


FIG. 5H

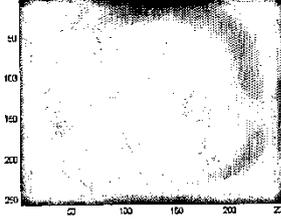


FIG. 5I

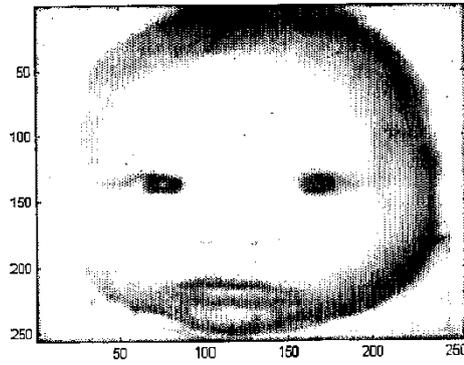


FIG. 6

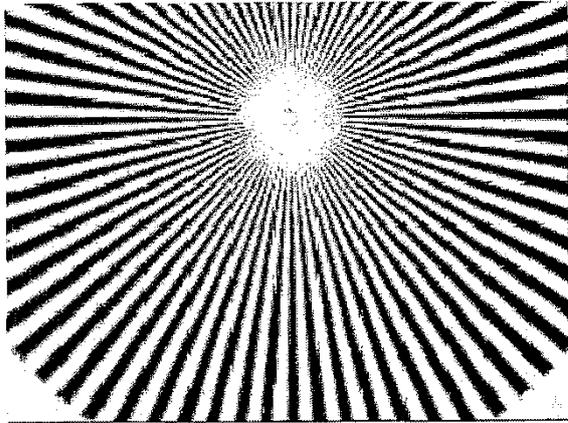


FIG. 7A

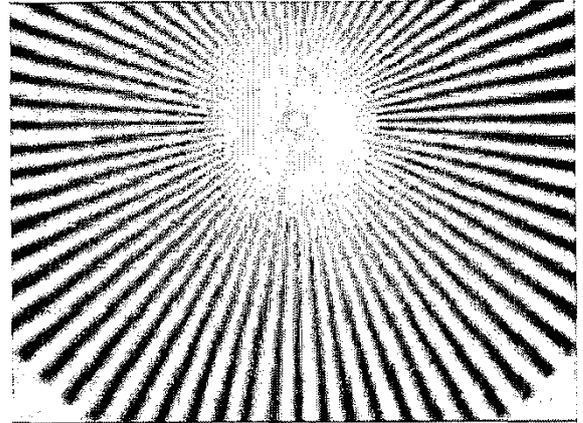


FIG. 7B

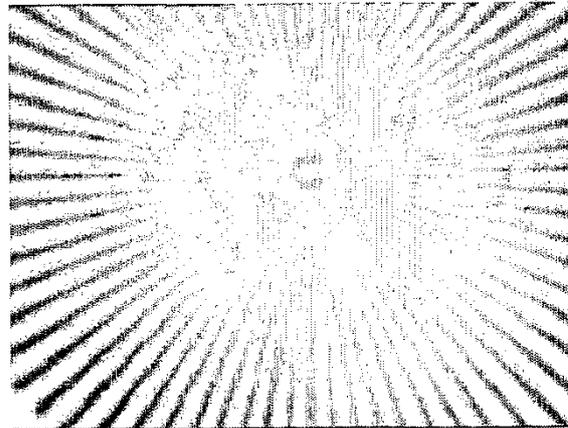


FIG. 7C

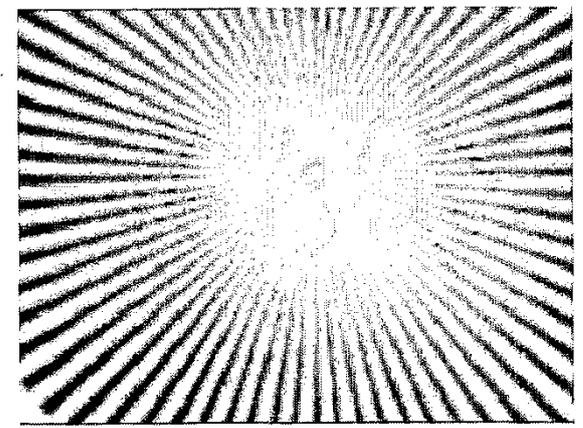


FIG. 7D

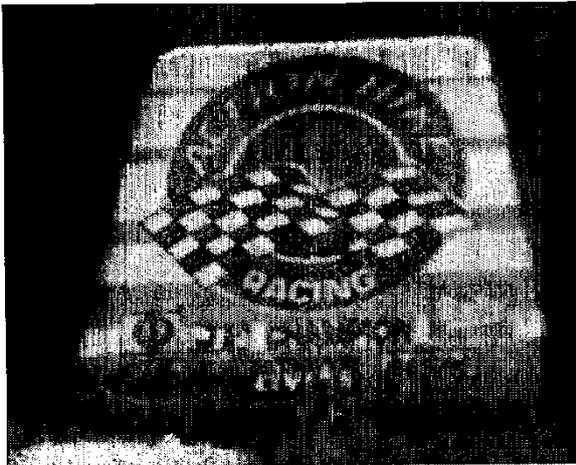


FIG. 8A

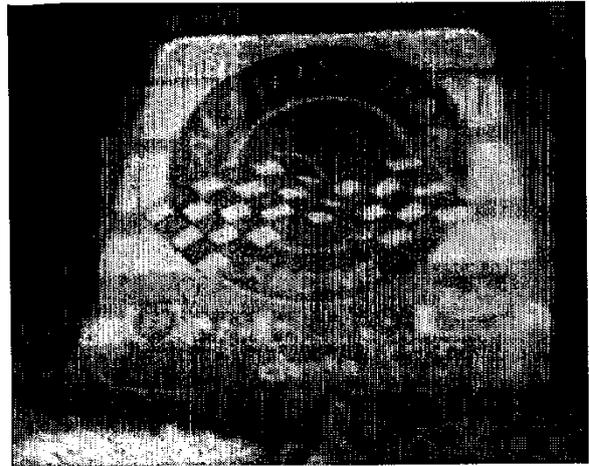


FIG. 8B

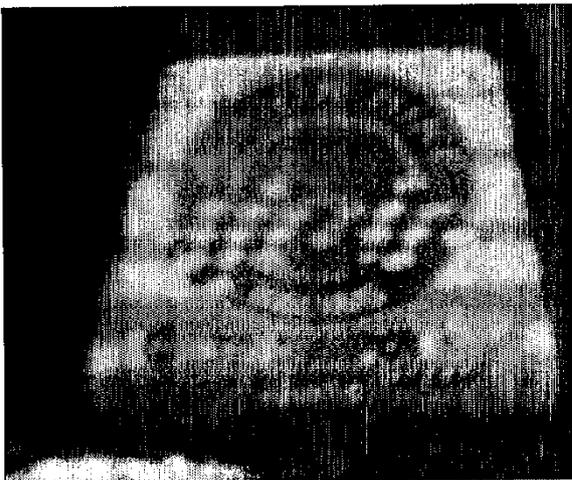


FIG. 8C

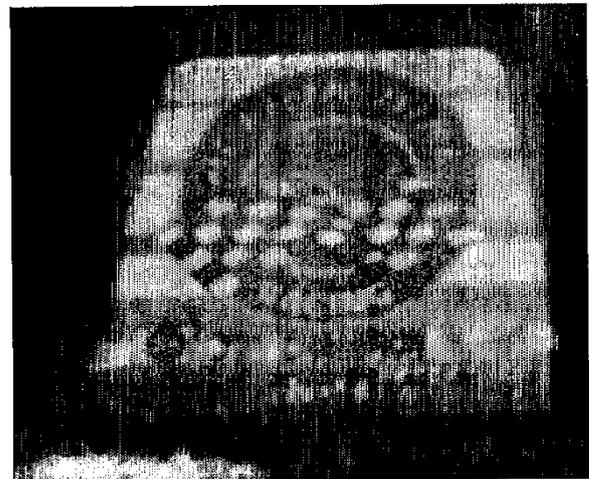


FIG. 8D

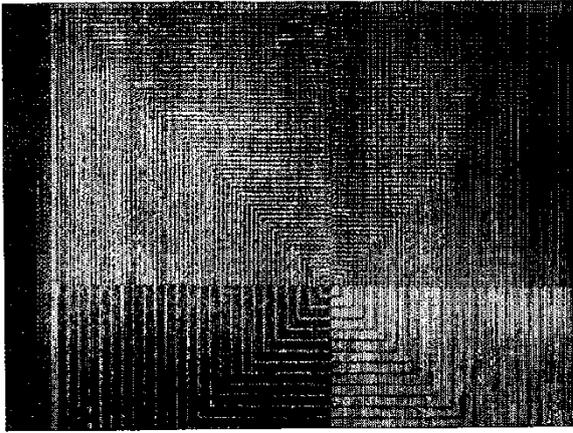


FIG. 9A

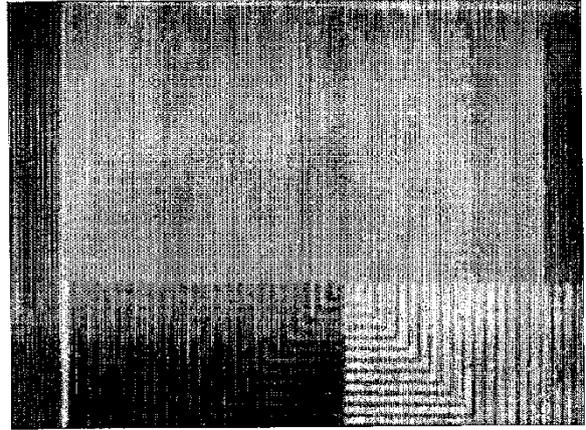


FIG. 9B

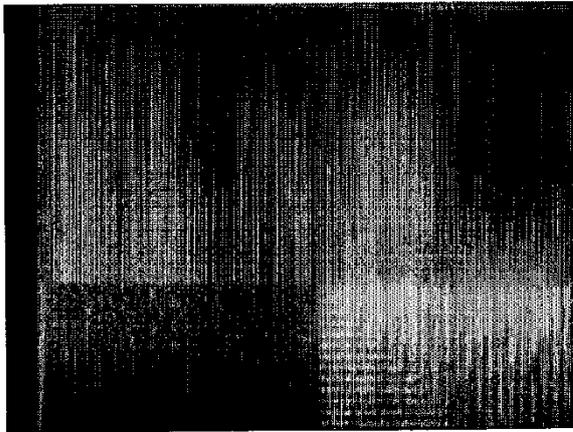


FIG. 9C

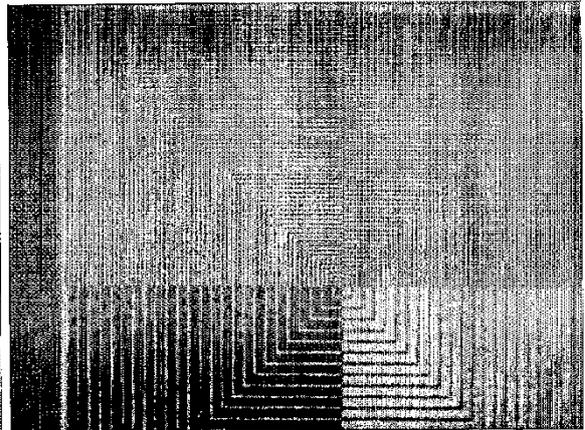


FIG. 9D

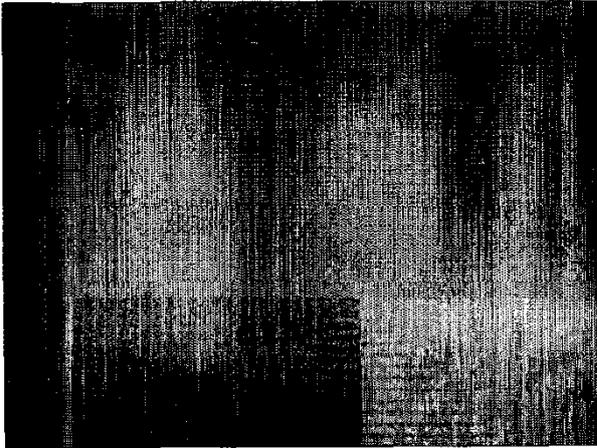


FIG. 9E

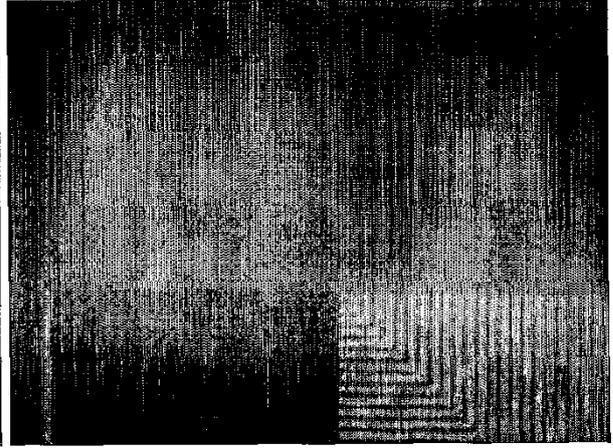


FIG. 9F

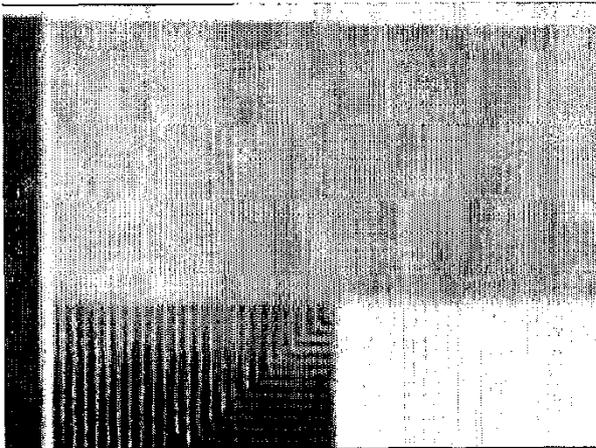


FIG. 9G

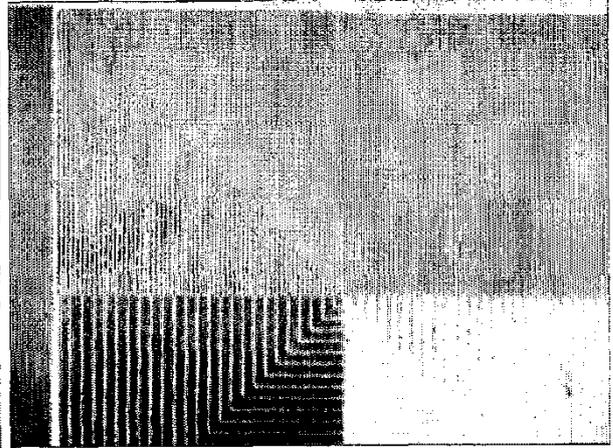


FIG. 9H

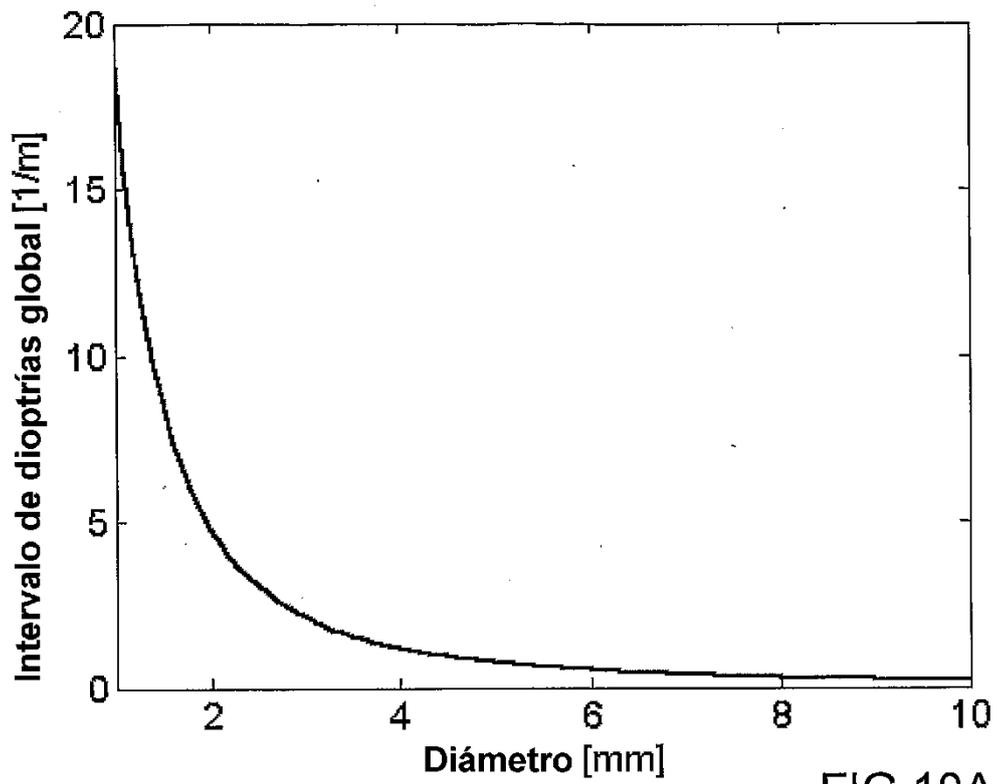


FIG.10A

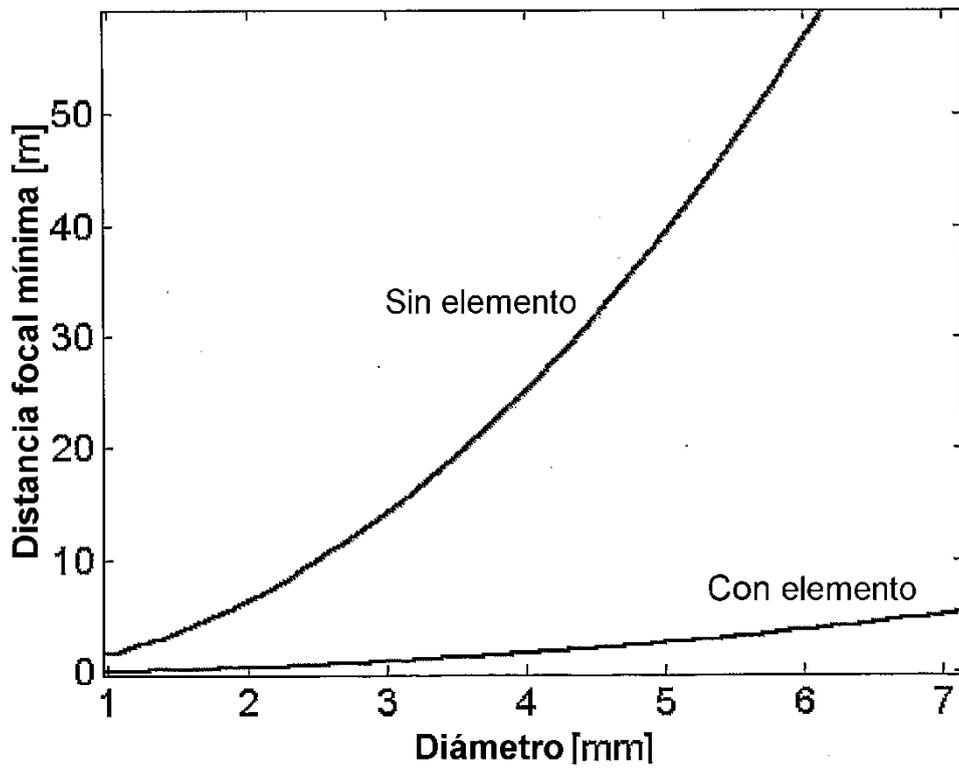


FIG.10B