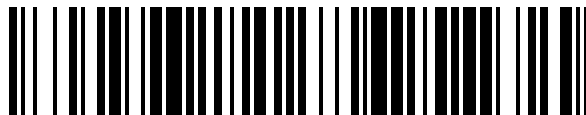


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **1 330 354**

21 Número de solicitud: 202532539

51 Int. Cl.:

G03H 1/08	(2006.01)	G02B 27/02	(2006.01)
G02B 27/01	(2006.01)		
G02B 5/32	(2006.01)		
G02B 27/42	(2006.01)		

12

SOLICITUD DE MODELO DE UTILIDAD

U

22 Fecha de presentación:

03.07.2023

43 Fecha de publicación de la solicitud:

09.07.2026

71 Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE ALICANTE (100,00%)
Carretera San Vicente del Raspeig s/n
03690 San Vicente del Raspeig (Alicante) ES

72 Inventor/es:

GALLEGO RICO, Sergi;
NEIPP LÓPEZ, Cristian;
SIRVENT VERDÚ, Joan Josep;
MÁRQUEZ RUIZ, Andrés y
BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Augusto

54 Título: **SISTEMA QUE COMPRENDE LENTES HOLOGRÁFICAS**

ES 1 330 354 U

DESCRIPCIÓN

SISTEMA QUE COMPRENDE LENTES HOLOGRÁFICAS

5 CAMPO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un sistema de guiado de luz que comprende lentes holográficas generadas con un método. Asimismo, los sistemas de guiado de luz descritos en la presente invención pueden aplicarse, preferentemente, en dispositivos de visión de realidad aumentada (en inglés, “augmented reality”, o AR).

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

La holografía es una técnica que emplea los principios de difracción de la luz para registrar y, posteriormente, reconstruir la información óptica tridimensional (3D) de objetos. En este contexto, juegan un papel clave los llamados elementos ópticos holográficos (EOHs). Dichos EOHs se fabrican a partir de materiales fotosensibles de alta resolución, capaces de registrar el patrón de interferencia producido por dos haces (típicamente, haces láser) coherentes y espacialmente superpuestos. El primero de dichos haces suele denominarse como haz de referencia, y el segundo como haz objeto, esto es, un haz reflejado o dispersado por el objeto cuya información óptica se quiere registrar en el material fotosensible. Así, un EOH se genera haciendo que el haz de referencia y el haz objeto interfieran en el material fotosensible, registrándose el patrón de dicha interferencia en el interior del material fotosensible, en la superficie donde coinciden el haz de referencia y el haz objeto. El patrón registrado comprende, así, la información 3D del objeto y crea una estructura fotónica capaz de difractar la luz. En consecuencia, es posible obtener una imagen reconstruida del objeto, a partir del haz difractado que resulta al incidir un haz de reconstrucción sobre el EOH.

Los EOHs pueden clasificarse en EOHs de transmisión o de reflexión, en función de cómo incidan los haces en el material fotosensible durante su generación. En la generación de un EOH de transmisión, el haz de referencia y el haz objeto inciden por el mismo lado del material fotosensible en el momento del registro, mientras que en la generación de un EOH de reflexión, los haces inciden desde lados opuestos.

Por otra parte, los EOHs se emplean en multitud de dispositivos, tales como los dispositivos de visión de realidad aumentada (AR). En los últimos años, los dispositivos de visión de AR

han experimentado un notable desarrollo, abarcando desde los campos de los videojuegos o de la automoción, hasta la generación de nuevos dispositivos inteligentes (por ejemplo, gafas o cascos de pilotos inteligentes) que permiten acceder a información en tiempo real y sin necesidad de desviar la mirada hacia la pantalla de un dispositivo accesorio (por ejemplo, de un dispositivo móvil). La necesidad de desarrollar este tipo de dispositivos ha surgido de dos cambios tecnológicos recientes:

- el consumo generalizado de contenido de vídeo accesible a través de las redes de telefonía móvil o de Internet en dispositivos móviles;

- la miniaturización de dichos dispositivos móviles, cuyos pesos y tamaños están esencialmente determinados por el tamaño de sus pantallas.

Frente a los dispositivos de video móviles, los dispositivos de visión de AR presentan principalmente tres ventajas: son sistemas manos-libres, tienen un alto carácter de privacidad y un mayor tamaño de las pantallas. Entre los diferentes dispositivos de visión de AR, destacan, por su alto nivel de aceptación por el gran público, aquellos con capacidad de “ver a través” (en inglés, “see-through”). Sin embargo, en los dispositivos “see-through” sigue siendo un reto combinar la visualización de imágenes en alta calidad con una visibilidad clara “a través” para diferentes aplicaciones.

En este contexto, los EOHs desempeñan un papel esencial en multitud de dispositivos de visión de AR, donde los EOHs guían la luz en un sistema de guiado de luz, actuando como acopladores de onda que introducen y extraen la luz en forma de imagen de sustratos de guiado de onda. Un ejemplo de estos sistemas de guiado de luz se describe en la patente estadounidense US 10,877,275 B2, que se refiere a un sistema basado en tres EOHs, en concreto, tres redes de relieve. Este sistema, además de ser complejo y costoso económicamente, cuenta con la principal desventaja de que las redes de relieve se deterioran mucho antes en el tiempo que un EOH basado en variaciones del índice de refracción, como por ejemplo las lentes holográficas.

Otros dispositivos de AR comprenden sistemas de guiado de luz basados en lentes holográficas. Un ejemplo de este tipo de sistemas se divulga en la solicitud de patente estadounidense US 2010/0157400 A1. Sin embargo, el método de registro que da lugar a las lentes holográficas de dicho sistema requiere el empleo de prismas de alta calidad óptica, lo que hace económicamente muy costosa la generación en masa de estos EOHs. Asimismo, el posicionamiento de los prismas para la generación de las lentes holográficas ha de ser tan preciso que se requiere mucho tiempo para fabricar cada lente holográfica en

la producción en masa. Todo ello dificulta la producción en masa de las lentes holográficas y, en consecuencia, de los sistemas que las comprenden.

5 Por otro lado, los sistemas de guiado de luz que comprenden lentes holográficas, como el divulgado en US 2010/0157400 A1, presentan dificultades a la hora de enfocar correctamente la imagen guiada por dichos sistemas. Asimismo, típicamente dichos sistemas comprenden un proyector de imagen, que genera la luz en forma de imagen que guía el sistema de guiado de luz. De esta manera, el sistema de guiado de luz forma una imagen que reproduce la imagen generada por el proyector de imagen, a partir de la luz
10 guiada por el mismo. Sin embargo, estos sistemas de guiado de luz requieren proyectores de imagen de grandes dimensiones y pesos, con el objeto de no afectar negativamente al tamaño de la imagen formada.

DESCRIPCIÓN BREVE DE LA INVENCION

15

La presente invención soluciona las limitaciones del estado de la técnica mencionadas anteriormente, proporcionando un sistema de guiado de luz que comprende lentes holográficas.

20 Cabe mencionar previamente el detalle del método de generación de una lente holográfica configurada para guiar luz hacia el interior y hacia el exterior de un sustrato, donde dicho sustrato comprende al menos una cara exterior y tiene un primer índice de refracción n_v , y la lente holográfica se genera con un material fotosensible configurado para registrar el patrón de interferencia entre dos haces de luz coherentes, comprendiendo dicho material
25 fotosensible al menos una primera superficie exterior y una segunda superficie exterior opuesta a la primera superficie exterior.

El método comprende las etapas de:

- incidir en el material fotosensible, al menos parcialmente, por la primera superficie exterior del material fotosensible, con un haz de referencia de longitud de onda sustancialmente igual a un valor de generación, λ_g ;
- dirigir un haz objeto de longitud de onda sustancialmente igual al valor de generación, λ_g , hacia el material fotosensible por medio de una lente analógica, e incidir en el material fotosensible, al menos parcialmente, por una de las superficies exteriores del material fotosensible con dicho haz objeto, de manera que el haz de referencia y el haz
35 objeto coinciden e interfieren en el interior del material fotosensible;

- registrar en el interior del material fotosensible el patrón de interferencia entre el haz de referencia y el haz objeto, donde el patrón de interferencia está caracterizado por un vector de red $\vec{K'}$.

5 Además, el método se caracteriza por que:

el material fotosensible está embebido en un medio y al menos una de sus superficies exteriores está en contacto con dicho medio, donde el medio tiene un segundo índice de refracción, n_a , menor que el primer índice de refracción, n_v ;

antes de incidir en el material fotosensible, el haz de referencia se propaga en el
10 medio con un ángulo igual a un primer valor angular, θ_1 , con respecto a la normal a la primera superficie exterior del material fotosensible;

antes de incidir en el material fotosensible, el haz objeto se propaga en el medio con un ángulo igual a un segundo valor angular, θ_2 , con respecto a la normal a la primera superficie exterior del material fotosensible;

15 al menos uno de entre los haces de referencia y objeto incide en el material fotosensible refractándose desde el medio hacia el interior del material fotosensible;

el material fotosensible tiene un tercer índice de refracción n_g mayor que el segundo índice de refracción n_a , y dicho tercer índice de refracción n_g , el valor de generación λ_g , el primer valor angular θ_1 y el segundo valor angular θ_2 fijan el vector de red $\vec{K'}$ del patrón de
20 interferencia, de manera que, cuando se dispone sobre la cara exterior del sustrato la superficie exterior de la lente holográfica generada opuesta a la superficie exterior por la que incide el haz objeto, la lente holográfica generada está configurada para obtener un rayo de luz difractado límite a partir de un rayo de luz de reconstrucción límite que incide en la lente holográfica por la primera superficie exterior de la misma, donde la longitud de onda del rayo
25 de luz de reconstrucción límite es sustancialmente igual a un valor límite, λ_{lim} , distinto del valor de generación λ_g . Además, el rayo de luz difractado límite atraviesa la superficie exterior dispuesta sobre la cara exterior del sustrato por un punto, formando un ángulo límite, θ_{lim} , en el interior del sustrato respecto a la dirección perpendicular en el punto de la superficie exterior atravesado por dicho rayo de luz difractado límite, siendo el ángulo límite
30 θ_{lim} igual al arcoseno del cociente entre el segundo índice de refracción n_a y el primer índice de refracción n_v .

La principal ventaja de este método es que se genera una lente holográfica que guía la luz, de manera que cumple la condición angular de reflexión total en el sustrato, sin utilizar
35 prismas ópticos para incidir el haz de referencia y el haz objeto en el material fotosensible.

Típicamente, en los métodos que emplean prismas ópticos, se pega de manera muy precisa sobre el material fotosensible al menos un prisma y, para para generar nuevas lentes holográficas, se despega dicho prisma de la lente holográfica ya generada, se limpia el mismo, y se pega de nuevo con precisión sobre otro material fotosensible. Todo ello dificulta y ralentiza de manera notable la producción en masa de lentes holográficas. A su vez, el empleo de primas ópticos encarece la producción en masa de lentes holográficas, pues dichos prismas son típicamente costosos. Por tanto, según lo anterior, el método de la presente invención permite ventajosamente generar lentes holográficas en masa, de manera rápida, fácil y económica, en particular, en comparación con los métodos que usan prismas ópticos.

En una realización preferente, el haz objeto incide en el material fotosensible, al menos parcialmente, por la primera superficie exterior del mismo. De esta manera, la lente generada es una lente holográfica de transmisión. Ventajosamente, para generar una lente holográfica de transmisión óptima, es típicamente suficiente que el valor de la resolución del material fotosensible empleado sea igual o menor que $0,5\ \mu\text{m}$, frente a los $0,2\ \mu\text{m}$ que típicamente se requieren para generar una lente holográfica de reflexión óptima.

Alternativamente, en otra realización del método, el haz objeto incide en el material fotosensible, al menos parcialmente, por la segunda superficie exterior del mismo. De esta manera, la lente generada es una lente holográfica de reflexión.

En otra realización preferente, el tercer índice de refracción n_g , el valor de generación λ_g , el primer valor angular θ_1 y el segundo valor angular θ_2 que fijan el vector de red $\vec{K}$ del patrón de interferencia, son tales que la lente holográfica generada está configurada para obtener el rayo de luz difractado límite a partir de un rayo de luz de reconstrucción límite que incide por la primera superficie exterior de manera sustancialmente perpendicular a la misma.

Por otro lado, en otra realización, el método comprende adicionalmente la etapa de estabilizar el patrón de interferencia registrado en el material fotosensible. De esta manera, el material fotosensible no cambia sus propiedades cuando posteriormente incide luz en el mismo, tras registrar el patrón de interferencia.

En una realización preferente adicional, el valor de la resolución del material fotosensible es igual o menor que $0,5\ \mu\text{m}$.

En otra realización preferente, el material fotosensible comprende un centro geométrico y la lente analógica comprende un centro óptico, estando separados el centro óptico de la lente analógica y el centro geométrico del material fotosensible por una distancia, h , y donde la lente analógica es una lente divergente; o la lente analógica es una lente convergente con una distancia focal igual a un valor focal, f , donde la distancia h entre el centro óptico de la lente analógica y el centro geométrico del material fotosensible es mayor que dicho valor focal f . De esta manera, la lente holográfica generada es una lente divergente.

Alternativamente, en otra realización preferente, el material fotosensible comprende un centro geométrico y la lente analógica comprende un centro óptico, estando separados el centro óptico de la lente analógica y el centro geométrico del material fotosensible por una distancia, h , y donde la lente analógica es una lente convergente con una distancia focal igual a un valor focal, f , donde la distancia h entre el centro óptico de la lente analógica y el centro geométrico del material fotosensible es menor o igual que dicho valor focal f . De esta manera, la lente holográfica generada es una lente convergente.

En otra realización preferente, el material fotosensible comprende un centro geométrico y el patrón de interferencia registrado en el material fotosensible está centrado respecto a dicho centro geométrico. Así, el centro geométrico del material fotosensible coincide con el centro óptico de la lente holográfica generada con dicho material. De esta manera, en realizaciones donde se genera una lente holográfica divergente con una lente analógica divergente, la distancia focal de la lente holográfica divergente es igual a la suma de la distancia focal de la lente analógica divergente y la distancia h entre el centro geométrico del material fotosensible y el centro óptico de la lente analógica. Por otro lado, en realizaciones donde una lente holográfica divergente es generada con una lente analógica convergente, la distancia focal de la lente holográfica divergente es igual a diferencia entre la distancia h entre el centro geométrico del material fotosensible y el centro óptico de la lente analógica, y el valor focal f de la lente analógica convergente. Asimismo, en realizaciones donde la lente holográfica es una lente holográfica convergente generada con una lente analógica convergente, la distancia focal de la lente holográfica convergente es igual a la diferencia entre el valor focal f y la distancia h entre el centro óptico de la lente analógica y el centro geométrico del material fotosensible.

Asimismo, en otra realización preferente del método, el material fotosensible es uno de los siguientes: un material de fase, un material de amplitud. Un material fotosensible es de fase cuando al incidir luz en él cambia el índice de refracción o el espesor del mismo, de manera

que, cuando una onda pasa a través de él, dicho material fotosensible modifica la fase de la onda. Un material fotosensible se denomina de amplitud, cuando al ser iluminado por luz, cambia la absorción de la luz de dicho material fotosensible, por lo que al ser iluminado una vez generada la lente holográfica, modifica la amplitud de la onda, es decir, su intensidad.

- 5 Preferentemente, el material fotosensible es un material de fase. Ventajosamente, el material de fase puede llegar a guiar el 100% de la luz que le incide, mientras que un material de amplitud no alcanza a guiar el 33% de la luz que le incide.

10 En otra realización preferente de la invención, el material fotosensible está compuesto, al menos parcialmente, por al menos uno de los siguientes: uno o más fotopolímeros, una o más fotorresinas, una o más gelatinas dicromatadas. Preferentemente, el material fotosensible está compuesto por uno o más fotopolímeros. Ventajosamente, los fotopolímeros requieren tratamientos mínimos de pre-procesado y post-procesado en comparación con otros materiales fotosensibles, como por ejemplo las fotorresinas o
15 gelatinas dicromatadas.

Por otra parte, en una realización preferente, el tercer índice de refracción n_g es igual o mayor que 0,9 veces el primer índice de refracción n_v , y menor igual que 1,1 veces el primer índice de refracción n_v .

20 En otra realización preferente del método, se emplea uno de los siguientes como un medio de sujeción del material fotosensible:

- el sustrato, donde una de las superficies exteriores del material fotosensible está dispuesta sobre la cara exterior del sustrato;
- 25 un bloque neutro transparente y de baja dispersión, que comprende al menos una cara exterior, donde una de las superficies exteriores del material fotosensible está dispuesta sobre dicha cara exterior. En este contexto, la expresión “baja” se interpretará como que el bloque neutro dispersa menos del 10% de la luz que recibe; o
- una o más pinzas que sostienen el material fotosensible.

30 Así, con un medio de sujeción se evita que el material fotosensible se curve indeseablemente durante el registro del patrón de interferencia.

En otra realización preferente, el tamaño de la sección transversal del haz de referencia y/o
35 el tamaño de la sección transversal del haz objeto son controlados por medio de al menos un diafragma.

En otra realización preferente, al menos una de las superficies exteriores del material fotosensible tiene propiedades adhesivas.

- 5 En otra realización preferente, el grosor del material fotosensible entre la primera superficie exterior y la segunda superficie exterior está comprendido entre 5 μm y 20 μm , y más particularmente, entre 10 μm y 15 μm .

10 Por otro lado, un objeto de la presente invención se refiere a una lente holográfica generada con el método descrito.

Otro objeto de la presente invención se refiere a un sistema de guiado de luz que comprende, al menos, un proyector de imagen configurado para generar luz en forma de una primera imagen, una primera lente holográfica, una segunda lente holográfica, y un
15 sustrato de guiado de onda que comprende una porción de entrada, una porción central y una porción de salida. Asimismo, el sustrato de guiado de onda comprende, al menos, una primera cara exterior y una segunda cara exterior opuesta a dicha primera cara exterior. Además:

la primera lente holográfica está dispuesta sobre una de las caras exteriores del
20 sustrato de guiado de onda en su porción de entrada;

la segunda lente holográfica está dispuesta sobre una de las caras exteriores del sustrato de guiado de onda en su porción de salida;

el proyector de imagen está configurado para dirigir la luz que genera hacia la primera lente holográfica;

25 la primera lente holográfica está configurada para guiar la luz que recibe del proyector de imagen, hacia el interior de la porción de entrada del sustrato de guiado de onda;

la porción central está configurada para guiar en su interior la luz guiada por la primera lente holográfica, desde la porción de entrada hasta la porción de salida;

30 la segunda lente holográfica está configurada para recibir la luz guiada hasta la porción de salida por la porción central, y guiar dicha luz que recibe hacia el exterior de la porción de salida del sustrato de guiado de onda; y

la primera lente holográfica, la segunda lente holográfica y el sustrato de guiado de onda están configurados para que el sustrato de guiado de onda guíe en su interior por
35 reflexión total la luz generada por el proyector de imagen, de manera que, a partir de la luz guiada por la segunda lente holográfica hacia el exterior de la porción de salida del sustrato

de guiado de onda, se reproduce con una segunda imagen la primera imagen generada por el proyector de imagen.

Además, el sistema de guiado de luz está caracterizado por que la primera lente holográfica y/o la segunda lente holográfica son lentes holográficas de acuerdo con el segundo objeto de la presente invención. Ventajosamente, como dichas lentes holográficas son generadas con un método que permite generar en masa las mismas de manera rápida, fácil y económica, los sistemas que comprenden dichas lentes holográfica también son producidos en masa de manera rápida, fácil y económica.

En una realización preferente de la invención, la primera lente holográfica y/o la segunda lente holográfica comprende al menos una de las siguientes: lente holográfica de transmisión, lente holográfica de reflexión, lente holográfica convergente, lente holográfica divergente.

En otra realización preferente de la invención, la segunda lente holográfica está configurada para guiar la luz que recibe del interior del sustrato de guiado de onda hacia una pantalla, de manera que se proyecta en dicha pantalla la segunda imagen que reproduce la primera imagen generada por el proyector de imagen. Preferentemente, la pantalla es, al menos parcialmente, transparente. Alternativamente, la segunda lente holográfica está configurada para guiar la luz que recibe del interior del sustrato de guiado de onda hacia el ojo de un usuario, de manera que el usuario ve la segunda imagen que reproduce la primera imagen generada por el proyector de imagen.

En una realización preferente de la invención, la primera lente holográfica comprende un centro óptico y tiene una distancia focal igual a un primer valor focal f_1 ; la segunda lente holográfica comprende un centro óptico y tiene una distancia focal igual a un segundo valor focal f_2 ; la distancia entre el centro óptico de la primera lente holográfica y el centro óptico de la segunda lente holográfica es sustancialmente igual a la suma del primer valor focal f_1 y el segundo valor focal f_2 ; el proyector de imagen comprende un plano imagen, donde dicho plano imagen está situado a una distancia del centro óptico de la primera lente holográfica sustancialmente igual al primer valor focal f_1 ; y la segunda imagen que reproduce la primera imagen generada por el proyector de imagen está situada a una distancia del centro óptico de la segunda lente holográfica sustancialmente igual al segundo valor focal f_2 .

La realización anterior del sistema de guiado de luz se denominará de aquí en adelante como “sistema 4f”. En el sistema 4f, la distancia imagen de la primera lente holográfica es aproximadamente o igual a infinito, mientras que la distancia imagen de la segunda lente holográfica es sustancialmente igual al segundo valor focal f_2 . En una lente con distancia focal f , la distancia imagen se entiende como la distancia a la cual dicha lente forma una imagen (real o virtual) de un objeto a partir de la luz que le llega del mismo, cuando el objeto está situado a una distancia dada respecto a dicha lente. En este contexto, ventajosamente, el sistema 4f permite enfocar perfectamente para el ojo humano la segunda imagen que reproduce la primera imagen generada por el proyector de imagen.

Preferentemente, en el sistema 4f anterior, el segundo valor focal f_2 de la segunda lente holográfica es mayor que el primer valor focal f_1 de la primera lente holográfica. En el sistema 4f, el escalado final de la segunda imagen es directamente proporcional, respecto a la primera imagen generada por el proyector de imagen, al cociente entre el segundo valor focal f_2 y el primer valor focal f_1 . Así, la segunda imagen tiene un mayor tamaño que la primera imagen cuando el segundo valor focal f_2 es mayor que el primer valor focal f_1 . Ventajosamente, esto permite reducir la dimensión y el peso del proyector de imagen comprendido en el sistema de guiado de luz, sin que el tamaño de la segunda imagen se vea negativamente afectado.

Por otro lado, en una realización preferente del sistema de guiado de luz de la presente invención, la luz que dirige el proyector de imagen incide en la primera lente holográfica por la primera superficie exterior de la misma, de manera sustancialmente perpendicular a dicha primera superficie exterior.

En otra realización preferente de la invención, el proyector de imagen es uno de los siguientes: un proyector basado en uno o más moduladores espaciales de luz, un proyector láser. Preferentemente, dicho proyector de imagen es uno de los siguientes: un proyector LCD, un proyector DLP.

En una realización preferente de la invención, el proyector de imagen está configurado para al menos una de la siguientes: generar la primera imagen en formato de alta definición y/o ultra alta definición, emitir luz de cualquier combinación de colores, emitir luz monocromática. Por otro lado, en otra realización preferente de la invención, el proyector de imagen tiene una anchura espectral inferior o igual a 40 nm.

En otra realización preferente de la invención, el sustrato de guiado de onda es transparente. Así, el sustrato de guiado de onda guía luz en su interior por reflexión total, desde la porción de entrada hasta la porción de salida, sin que dicha luz sea absorbida o difunda por el mismo.

5

Otro objeto de la presente invención se refiere a un dispositivo de visión de realidad aumentada que comprende un sistema de guiado de luz según el tercer objeto de la presente invención. Preferentemente, el dispositivo de visión de realidad aumentada comprende uno de los siguientes: unas gafas inteligentes, un casco inteligente, o una luna de un vehículo.

10

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para completar la descripción y con el propósito de ayudar a una mejor comprensión de la invención, se dispone un conjunto de dibujos. Dichos dibujos forman una parte integral de la descripción e ilustran diferentes realizaciones de la presente invención, las cuales no deben interpretarse como restrictivas del alcance de la invención, sino como ejemplos de cómo se puede llevar a cabo la misma. Los dibujos adjuntos comprenden específicamente las siguientes figuras:

15

20

La Figura 1 muestra una representación esquemática de un método de generación de lentes holográficas, de acuerdo con una realización de apoyo a la presente invención.

25

La Figura 2 muestra una representación esquemática de un método de generación de lentes holográficas, de acuerdo con otra realización de apoyo a la presente invención.

La Figura 3 muestra una representación esquemática de un sistema de guiado de luz de acuerdo con una realización de la presente invención.

30

La Figura 4 muestra una representación esquemática de un sistema de guiado de luz de acuerdo con otra realización de la presente invención.

Referencias numéricas utilizadas en las figuras:

(1)	Lente analógica
(1a)	Lente holográfica

(1b)	Centro óptico
(2)	Material fotosensible
(2a)	Centro geométrico
(3)	Haz de referencia
(4)	Haz objeto
(5)	Primera superficie exterior del material fotosensible
(6)	Segunda superficie exterior del material fotosensible
(7)	Sustrato
(7a)	Cara exterior
(7b)	Rayo de luz difractado
(8)	Medio
(9,9')	Diafragmas
(10)	Sistema de guiado de luz
(10a)	Sistema de guiado de luz
(11)	Proyector de imagen
(12)	Primera lente holográfica
(13)	Sustrato de guiado de onda
(14)	Segunda lente holográfica
(15)	Primera imagen
(15a)	Plano imagen
(16)	Porción de entrada del sustrato de guiado de onda
(17)	Porción central del sustrato de guiado de onda
(18)	Porción de salida del sustrato de guiado de onda
(19)	Primera cara exterior del sustrato de guiado de onda
(20)	Segunda cara exterior del sustrato de guiado de onda
(21)	Segunda imagen
(22)	Pantalla
(23)	Ojo de un usuario

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

5 Como se ha mencionado, un objeto de la presente invención se refiere a un sistema de guiado de luz que comprende las lentes holográficas generadas con un método.

La Figura 1 muestra una representación esquemática del método de generación de una lente holográfica (1a) a partir de una lente analógica (1), de acuerdo con una realización preferente de la presente invención. En este contexto, la lente analógica (1) se entiende como cualquier elemento óptico configurado para enfocar o dispersar la luz por medio de la refracción. Así, la lente holográfica (1a) se genera mediante el registro en un material fotosensible (2) del patrón de interferencia entre dos haces de luz (3, 4) coherentes temporal y espacialmente. El primer haz de luz es un haz de referencia (3), mientras que el segundo haz de luz es un haz objeto (4) procedente de la lente analógica (1) cuya información tridimensional se desea reconstruir mediante el patrón de interferencia registrado. En este sentido, el patrón de interferencia registrado en el material fotosensible (2) es tal que la lente holográfica (1a) generada es capaz de enfocar o dispersar la luz como si se tratara de una lente analógica.

En el contexto anterior, la longitud de onda del haz de referencia (3) y la longitud de onda del haz objeto (4) son sustancialmente iguales a un valor de generación λ_g . Aquí, la expresión “sustancialmente” se interpretará como igual o comprendida dentro un rango de variación de $\pm 0,02\%$, de manera que se evita el conocido fenómeno de batimiento y los haces (3, 4) son coherentes temporal y espacialmente.

El material fotosensible (2) comprende una primera superficie exterior (5) y una segunda superficie exterior (6), opuesta a la primera superficie exterior (6). En este contexto, el haz de referencia (3) y el haz objeto (4) inciden en el material fotosensible (2), al menos parcialmente, por su primera superficie exterior (5), de manera que el haz de referencia (3) y el haz objeto (4) coinciden e interfieren en el interior del material fotosensible (2). Además, la lente analógica (1) de la Figura 1 es una lente analógica convergente. Así, la lente holográfica (1a) generada es una lente holográfica (1a) convergente de transmisión.

Por otro lado, en la realización de la Figura 1, la segunda superficie exterior (6) del material fotosensible (2) está dispuesta sobre una cara exterior (7a) de un sustrato (7). En este contexto, se entiende como sustrato (7) cualquier sustrato de guiado de onda que formará parte de un sistema de guiado de luz. Típicamente, un sistema de guiado de luz comprende, al menos, una primera lente holográfica, un sustrato de guiado de onda, una segunda lente holográfica y un proyector de imagen. En este contexto, la luz guiada por el sistema de guiado de luz es la generada en forma de una primera imagen por el proyector de imagen. Dicha luz es primeramente introducida en el sustrato de guiado de onda por medio de la primera lente holográfica, guiada posteriormente por el interior del sustrato de guiado de

onda, y dirigida finalmente hacia el exterior de dicho sustrato por medio de la segunda lente holográfica.

Los sistemas de guiado de luz se aplican típicamente en dispositivos de visión de realidad aumentada (AR). Ejemplos no limitativos de estos dispositivos de visión de AR son gafas o cascos inteligentes, donde el sustrato de guiado de onda es típicamente un elemento transparente, a través del cual ve el mundo un usuario del dispositivo de visión de AR. Generalmente, este tipo de sustrato de guiado de onda está compuesto por vidrio, plástico, u otros materiales conocidos en el estado de la técnica. En este contexto, la luz del sistema de guiado de luz es guiada hacia el exterior del sustrato de guiado de onda por medio de la segunda lente holográfica, de manera que el usuario ve, a través de dicho sustrato de guiado de onda, una segunda imagen que reproduce la primera imagen generada por el proyector de imagen. Dicha segunda imagen se superpone con el mundo real que el usuario ve a través del sustrato de guiado de onda. En este sentido, la luz tiene que propagarse por reflexión total en el interior del sustrato de guiado de onda, para no perder información de la primera imagen durante la propagación de la luz en el sistema de guiado de luz.

Por tanto, según lo anterior, la lente holográfica (1a) generada en la Figura 1 y el sustrato (7) serán parte de un sistema de guiado de luz, donde la lente holográfica (1a) generada será una de las lentes holográficas comprendidas en dicho sistema de guiado de luz. De esta forma, el material fotosensible (2) no se curva de manera indeseable durante la implementación del método y, ventajosamente, no es necesario quitar la lente holográfica (1a) del sustrato (7) tras la generación de la misma para luego colocarla en un sistema de guiado de luz. Se evita así someter dicha lente holográfica (1a) a tensiones que pueden deformar la misma.

Por otro lado, el sustrato (7) tiene un primer índice de refracción n_v , y está embebido en un medio (8) que tiene un segundo índice de refracción n_a menor que el primer índice de refracción n_v . Así, si en el interior de dicho sustrato (7) se propaga luz por reflexión total, dicha luz no se refracta del interior del sustrato (7) hacia el medio (8) en el que está embebido. Ejemplos no limitativos del medio (8) son aire, agua, entre otros.

En este contexto, a diferencia de los métodos de generación de lentes holográficas que utilizan prismas ópticos, el material fotosensible (2) se encuentra embebido en el medio (8). Además, la primera superficie exterior (5) del material fotosensible (2) está en contacto con dicho medio (8).

Asimismo, antes de incidir en el material fotosensible (2), el haz de referencia (3) se propaga en el medio (8) con un ángulo igual a un primer valor angular, θ_1 , con respecto a la normal a la primera superficie exterior (5) del material fotosensible (2). Preferentemente, el haz de referencia (3) es un haz colimado, esto es, un haz de luz que comprende una pluralidad de rayos de luz paralelos entre sí. Asimismo, antes de incidir en el material fotosensible (2), el haz objeto (4) se propaga en el medio (8) con un ángulo igual a un segundo valor angular, θ_2 , con respecto a la normal a la primera superficie exterior (5) del material fotosensible (2). Es más, la incidencia por la primera superficie exterior (5) de ambos haces (3, 4) es tal que atraviesan dicha superficie (5) refractándose desde el medio (8) hacia el interior del material fotosensible (2).

En la realización de la Figura 1, y más adelante en la realización de la Figura 2, se muestra la dirección normal a la primera superficie exterior (5) con una flecha a trazos. En este contexto, típicamente se toma como dirección normal a la primera superficie exterior (5) la dirección que, tras el registro, definirá el eje respecto al cual estará centrado el patrón de interferencia registrado en el interior del material fotosensible (2). En las realizaciones de las Figuras 1 y 2, la normal a la primera superficie exterior (5) es la dirección normal a la primera superficie exterior (5) en el punto situado en el centro de dicha superficie exterior (5), y se hace interferir los haces (3, 4) de referencia y objeto de modo el patrón de interferencia registrado esté centrado respecto a la primera superficie exterior (5). En otras realizaciones, la dirección normal a la primera superficie exterior (5) es la de dirección normal de otro punto de la primera superficie exterior (5), y los haces (3, 4) de referencia y objeto se hacen interferir de modo que el patrón de interferencia registrado no esté centrado respecto a la primera superficie exterior (5).

Según la descripción anterior, el primer valor angular θ_1 y el segundo valor angular θ_2 se definen respecto a la normal a la primera superficie exterior (5) del material fotosensible (2). Dicha dirección normal se puede tomar, por ejemplo, como la dirección de un eje cartesiano. En este contexto, cuando la dirección y el sentido de cada uno de los dos haces (3, 4) de referencia y objeto son tales que dicha dirección atraviesa la primera superficie exterior (5), y dicho sentido va de fuera a dentro del material fotosensible (2), el valor angular correspondiente $\theta_{1,2}$ se toma, respecto al eje cartesiano, en sentido antihorario y con valor positivo. Por otro lado, cuando la dirección y el sentido de cada haz (3, 4) son tales que dicha dirección atraviesa la primera superficie exterior (5), y dicho sentido va de dentro a fuera del material fotosensible (2), el valor angular correspondiente $\theta_{1,2}$ se toma, respecto al

eje cartesiano, en sentido horario y con valor negativo. Así, en la Figura 1 y en la Figura 2 se han representado los arcos del primer valor angular θ_1 y el segundo valor angular θ_2 con líneas punteadas. Asimismo, se ha indicado sobre dichas líneas el sentido correspondiente (horario o antihorario), según la explicación anterior.

5

Por otro lado, cuando sea necesario, en las Figuras 1 y 2 se representan con líneas rectas punteadas las direcciones de los haces de referencia y objeto (3, 4), con el fin de visualizar mejor cómo se toman los correspondientes valores angulares $\theta_{1,2}$. La dirección de propagación de un haz (3, 4) viene dada por la dirección del rayo de luz menos inclinado comprendido en dicho haz (3, 4), con respecto a la normal a la primera superficie exterior (5) del material fotosensible (2). Si el haz de luz es un haz colimado (como el haz de referencia (3) de las Figuras 1 y 2), todos los rayos comprendidos en el mismo son paralelos y tienen la misma inclinación respecto a dicha normal. Si el haz es dirigido hacia el material fotosensible (2) por medio de una lente analógica (1) convergente (como el haz objeto (4) de las Figuras 1 y 2), la dirección del haz se corresponde con la del rayo más externo del mismo tras ser enfocado por dicha lente analógica (1). Por otro lado, si el haz es dirigido hacia el material fotosensible (2) por medio de una lente analógica (1) divergente, la dirección del haz se corresponde con la del rayo más interno del mismo tras ser dispersado por dicha lente analógica (1).

20

Asimismo, el material fotosensible (2) tiene un tercer índice de refracción n_g . En este sentido, el índice de refracción n_g del material fotosensible (2) es el que éste tiene cuando incide luz en el mismo. Por ejemplo, como es sabido, si el material fotosensible (2) es un material de fase, su índice de refracción en ocasiones es diferente cuando incide luz en dicho material fotosensible (2) a cuando no incide luz en él, mientras que si el material fotosensible (2) es un material de amplitud, el índice es el mismo incida o no luz en el material fotosensible (2). Por otro lado, preferentemente, el tercer índice de refracción n_g es mayor que el segundo índice de refracción n_a .

30

En este contexto, el tercer índice de refracción n_g , el primer valor angular θ_1 , el segundo valor angular θ_2 y el valor de generación λ_g son tales que la lente holográfica (1a) generada con el método está configurada para difractar un rayo de luz de reconstrucción (10a) límite hacia el interior del sustrato (7). El rayo de luz difractado (7b) límite es el rayo de luz difractado (7b) por la lente holográfica (1a), a partir de un rayo de reconstrucción límite. En el contexto de la presente invención, el rayo de luz de reconstrucción (10a) límite es un rayo

35

que incide por la primera superficie exterior (5) de la lente holográfica (1a) generada con el método, tal que cumple con las siguientes condiciones:

- a) su respectivo vector de red $\vec{K}$ de reconstrucción es igual al vector de red $\vec{K}'$ que caracteriza el patrón de interferencia; y
- 5 b) su respectivo rayo de luz difractado (7b) límite atraviesa una de las superficies exteriores (5, 6) de la lente holográfica (1a) por un punto, formando un ángulo límite θ_{lim} en el interior del sustrato (7) con respecto a la dirección perpendicular a dicho punto atravesado. La superficie exterior (5, 6) atravesada por el rayo de luz difractado (7b) límite, es la superficie exterior (5, 6) opuesta a la superficie exterior (5, 6) por la que incide el haz objeto (4) en la generación de la lente holográfica (1a). Así, en la lente generada en Figura 1, la superficie exterior (5, 6) atravesada por el rayo de luz difractado (7b) límite es la segunda superficie exterior (6) de la lente holográfica (1a) generada. El ángulo límite θ_{lim} es igual al ángulo crítico de reflexión total, esto es, es igual al arcoseno del cociente entre el segundo índice de refracción n_a y el primer índice de refracción n_v , $\theta_{lim} = \arcsin(n_a / n_v)$.

Además, a diferencia de los métodos que utilizan prismas ópticos, el valor de la longitud de onda del rayo de luz de reconstrucción (10a) límite es distinto del valor de generación λ_g , y es sustancialmente igual a un valor límite λ_{lim} . En este contexto, la expresión

20 “sustancialmente” se interpretará como igual o comprendida dentro un rango de variación de $\pm 0,02\%$.

En el contexto anterior, el vector de red $\vec{K}'$ que caracteriza el patrón de interferencia viene dado por

$$25 \quad \vec{K}' = \vec{K}_1 - \vec{K}_2,$$

esto es, la diferencia entre el vector característico $\vec{K}_1$ del haz de referencia (3) y el vector característico $\vec{K}_2$ del haz objeto (4). Ambos vectores característicos tienen el mismo módulo $|\vec{K}_1| = |\vec{K}_2|$, que viene dado por $|\vec{K}_1| = |\vec{K}_2| = 2 \pi n_g / \lambda_g$, donde n_g es el tercer índice de refracción y λ_g es el valor de generación. Además, la dirección del vector característico de cada haz (3, 4) viene dada por el ángulo que forma dicho haz (3, 4) en el interior del material fotosensible (2), y que se relaciona con el primer/segundo valor angular $\theta_{1,2}$ por medio la ley de Snell. Así, basándonos en lo anterior, el tercer índice de refracción n_g , el primer valor angular θ_1 , el segundo valor angular θ_2 y el valor de generación λ_g fijan el vector de red $\vec{K}'$ que caracteriza el patrón de interferencia registrado en el material fotosensible (2).

Por otro lado, el vector de red $\vec{K}$ de reconstrucción viene dado por

$$\vec{K} = \vec{K}_r - \vec{K}_d,$$

esto es, la diferencia entre el vector característico $\vec{K}_r$ del rayo de luz de reconstrucción (10a)

- 5 límite y el vector característico $\vec{K}_d$ del rayo de luz difractado (7b) límite. Ambos vectores característicos tienen el mismo módulo $|\vec{K}_r| = |\vec{K}_d|$, que viene dado por $|\vec{K}_r| = |\vec{K}_d| = 2 \pi n_g / \lambda_{\text{lim}}$, donde n_g es el tercer índice de refracción, y λ_{lim} es el valor límite. La dirección del vector característico $\vec{K}_d$ del rayo de luz difractado (7b) límite, viene dada por el ángulo que forma dicho rayo en el interior del material fotosensible (2). Este ángulo se relaciona, por medio de
- 10 la ley de Snell, con el ángulo límite θ_{lim} . Asimismo, la dirección del vector característico $\vec{K}_r$ del rayo de luz de reconstrucción (10a) límite viene dada por el ángulo que forma dicho rayo en el interior del material fotosensible (2). Este ángulo se relaciona, por medio de la ley de Snell, con el ángulo que forma el rayo de luz de reconstrucción (10a) límite en el medio (8) antes de incidir en la primera superficie exterior (5).

15

En este contexto, la lente holográfica (1a) de transmisión generada en la Figura 1, está configurada para guiar un rayo de prueba que incide en la primera superficie exterior (5) de la misma hacia el interior del sustrato (7), donde el ángulo de incidencia respecto a la normal a la primera superficie exterior (5) es mayor o igual que el rayo de reconstrucción límite. El

20 rayo difractado resultante atraviesa la segunda superficie exterior (6) por un punto de la misma, y forma un ángulo en el interior del sustrato (7) respecto a la dirección perpendicular en ese punto mayor que el ángulo límite θ_{lim} . Para que esto suceda, el valor de la longitud de onda del rayo de prueba tiene que ser mayor que el valor de la longitud de onda del rayo de reconstrucción límite. En este sentido, el rayo de prueba es un rayo cuyo respectivo vector

25 de red $\vec{K}_p$ es igual al vector de red $\vec{K}$ que caracteriza el patrón de interferencia. El vector de red $\vec{K}_p$ del rayo de prueba viene dado por $\vec{K}_p = \vec{K}_r - \vec{K}_{pd}$, esto es, la diferencia entre el vector característico $\vec{K}_p$ del rayo de prueba y el vector característico $\vec{K}_{pd}$ del rayo difractado por la lente holográfica (1a) a partir del rayo de prueba. Estos vectores característicos se definen de manera análoga a los anteriormente descritos. Por otro lado, el rayo difractado

30 forma un ángulo en el interior del sustrato (7) que satisface la condición angular requerida para la reflexión total (esto es, es mayor o igual que el ángulo crítico de reflexión total).

Asimismo, la lente holográfica (1a) generara en la Figura 1 también está configurada para guiar luz hacia el exterior del sustrato (7). Y, más concretamente, la lente holográfica (1a)

- difracta otro rayo de prueba de longitud de onda mayor o igual que la del rayo de reconstrucción límite, cuando dicho rayo de prueba incide, desde el interior del sustrato (7), en la segunda superficie exterior (6) por un punto de la misma. El rayo difractado resultante forma un ángulo respecto a la normal a la primera superficie exterior (5), mayor o igual al
- 5 formado por el rayo de reconstrucción límite. Para que esto suceda, el rayo de prueba forma un ángulo de incidencia en el interior del sustrato (7) mayor o igual que el ángulo límite θ_{lim} , respecto a la dirección perpendicular en el punto de la segunda superficie exterior (6) que atraviesa. Así pues, el rayo de prueba es de nuevo un rayo cuyo respectivo vector de red $\vec{K}_p$ es igual al vector de red $\vec{K}'$ que caracteriza el del patrón de interferencia registrado. El vector
- 10 de red $\vec{K}_p$ del rayo de prueba se define de manera análoga a los casos anteriores. Por otro lado, el rayo de prueba forma un ángulo en el interior del sustrato (7) que satisface la condición angular requerida para la reflexión total (esto es, es mayor o igual que el ángulo crítico de reflexión total).
- 15 Basándonos en lo anterior, la lente holográfica (1a) generada en el método de la presente invención está configurada para guiar luz hacia el interior y hacia el exterior del sustrato (7), donde la luz guiada por la lente holográfica (1a) puede propagarse en el interior de dicho sustrato (7) por medio del fenómeno de la reflexión total y, en consecuencia, no ser refractada hacia el medio (8) en el que el sustrato (7) está embebido. Esto sucede no sólo
- 20 en realizaciones donde la lente holográfica (1a) está dispuesta en una de las dos caras opuestas de un sustrato (7), donde dichas caras opuestas son planas y paralelas (como en las Figuras 1 y 2). En otros ejemplos no limitativos, dichas caras opuestas del sustrato (7) son curvadas (por ejemplo, un sustrato (7) convexo o cóncavo). Las condiciones necesarias para que un rayo de luz se propague por reflexión total en el interior de un sustrato (7) de
- 25 cualquier forma geométrica, son conocidas por el experto en la materia. Por ejemplo, considérese que el sustrato (7) tiene caras opuestas curvadas, es de vidrio con el primer índice de refracción n_v igual a 1,5, y el medio (8) en el que dicho sustrato (7) está embebido es aire con el segundo índice de refracción n_a igual a 1. En tal caso, un rayo de luz se propaga en el interior de dicho sustrato (7) por reflexión total, cuando entre una primera
- 30 reflexión interna en un primer punto de una cara del sustrato (7) y la reflexión interna inmediatamente posterior en un segundo punto de la cara opuesta de dicho sustrato (7), el ángulo que forman la dirección normal en el primer punto y la dirección normal en el segundo punto es, preferentemente, igual o inferior a unos 20°.
- 35 Con todo, en el método de la presente invención se generan lentes holográficas tales que la luz que guían cumple la condición angular de reflexión total en el sustrato (7), sin utilizar

prismas ópticos para incidir el haz de referencia (3) y el haz objeto (4) en el material fotosensible (2). Generalmente, en los métodos que emplean prismas ópticos se pega al menos un prisma óptico al material fotosensible (2) por su primera superficie exterior (5). Posteriormente, se hace atravesar al menos uno entre los haces (3, 4) de referencia y objeto por las caras del prisma, de manera que, por medio de las reflexiones y refracciones internas en el prisma, al menos uno de dichos haces (3, 4) incide en el material fotosensible (2), refractándose desde el prisma hacia dicho material fotosensible (2). Típicamente, el prisma está configurado para que los ángulos de incidencia de los haces (3, 4) en el material fotosensible (2), sean tales que el rayo de reconstrucción límite que cumple las condiciones a) y b) anteriormente descritas, es aquel cuyo valor límite λ_{lim} coincide con el valor de generación λ_g de los haces (3, 4) de referencia y objeto. Por otro lado, el pegado del prisma óptico al material fotosensible (2) ha de ser muy preciso, evitando la formación de burbujas entre el material fotosensible (2) y el prisma. Además, aunque ello se consiguiera, para para generar nuevas lentes holográficas es necesario despegar el prisma de la lente ya generada, limpiar el mismo, y pegarlo de nuevo con precisión sobre otro material fotosensible (2). Todo ello dificulta y ralentiza de manera notable la producción en masa de lentes holográficas. Asimismo, los prismas ópticos son relativamente costosos, lo que encarece dicha producción en masa.

Según lo descrito anteriormente, puesto que en el método se genera una lente holográfica (1a) sin la utilización de prismas ópticos, ello permite ventajosamente generar lentes holográficas en masa, de manera rápida, fácil y económica.

En una realización preferente del método, el tercer índice de refracción n_g , el valor de generación λ_g , el primer valor angular θ_1 , y el segundo valor angular θ_2 son tales que el rayo de luz de reconstrucción (10a) límite anteriormente definido es aquel que incide en la lente holográfica (1a) generada por su primera superficie exterior (5), de manera sustancialmente perpendicular a la misma. La lente holográfica (1a) así generada es adecuada, por ejemplo, para los dispositivos de visión de AR que comprenden un sistema de guiado de luz, donde un proyector de imagen genera la luz guiada por dicho sistema, y donde dicha luz incide de manera sustancialmente perpendicular a la lente holográfica (1a) que guía la luz hacia el interior de un sustrato de guía de onda. En este sentido, la expresión “sustancialmente” dependerá del grosor de la lente holográfica (1a). Como es sabido por el experto en la materia, la selectividad angular de una lente holográfica (1a) depende del grosor de la misma, siendo tanto más restrictiva la selectividad angular cuanto mayor es ese grosor. Así, por ejemplo, cuando una lente holográfica (1a) tiene un grosor de 20 μm , y un rayo de luz

incide por un punto de la primera superficie exterior (5) de la misma de manera sustancialmente perpendicular, la expresión “sustancialmente” se interpreta como que la dirección de dicho rayo es paralela a la normal a dicha primera superficie exterior (5), con un rango de variación respecto a dicha dirección de $\pm 5^\circ$. Cuando, en otro ejemplo el grosor es de $5\ \mu\text{m}$, la expresión “sustancialmente” se interpreta como que la dirección de dicho rayo es paralela a la normal a dicha primera superficie exterior (5), con un rango de variación respecto a dicha dirección de $\pm 10^\circ$.

A continuación, se expone un ejemplo con valores numéricos, donde la lente holográfica (1a) generada en la Figura 1 guía hacia el interior/exterior del sustrato (7) rayos de longitud de onda mayores o iguales que $633\ \text{nm}$ (esto es, longitud de onda del color rojo). Las direcciones de dichos rayos cumplen con la condición angular requerida para la reflexión total en el interior del sustrato (7). Asimismo, dichos rayos atraviesan perpendicularmente la primera superficie exterior (5) de la lente holográfica (1a). Para ello, la lente holográfica (1a) se genera con un haz de referencia (3) y un haz objeto (4), donde el valor de generación λ_g de su longitud de onda es igual a $532\ \text{nm}$. Por ejemplo, el haz de referencia (3) y el haz objeto (4) pueden ser haces de láseres verdes, comúnmente empleados en la generación de elementos ópticos holográficos. Asimismo, el segundo índice de refracción n_a (esto es, el del medio (8)) es igual a 1 (esto es, el medio (8) es aire), y el tercer índice de refracción n_g (esto es, el del material fotosensible (2)) es igual a 1,478. Además, el haz de referencia (3) incide en el material fotosensible (2) con un primer valor angular θ_1 igual a $5,2^\circ$, y el haz objeto (4) incide en el material fotosensible (2) con un segundo valor angular θ_2 igual a $68,5^\circ$. Así, el valor límite λ_{lim} del rayo de reconstrucción límite que incide en material fotosensible (2) de manera perpendicular a la primera superficie exterior (5), y que cumple las condiciones a) y b) anteriormente descritas, es igual a $633\ \text{nm}$. Por otro lado, si el valor del primer índice de refracción n_v (esto es, el del sustrato (7)) es igual a 1,5 (como, por ejemplo, cuando el sustrato (7) está compuesto por vidrio) el valor angular límite θ_{lim} es igual a $41,8^\circ$.

Otros ejemplos numéricos de la realización de la Figura 1 son fácilmente deducibles por un experto en la materia, a partir de la información contenida en el presente documento. Por ejemplo, la lente holográfica (1a) generada en la Figura 1 puede estar configurada para guiar luz blanca hacia el interior/exterior del sustrato (7), donde dicha luz cumple con la condición angular requerida para la reflexión total en el interior del mismo. En la presente invención, se define luz blanca como un haz de luz formado por rayos con tres longitudes de onda (longitud de onda en rojo λ_1 , longitud de onda en verde λ_2 , y longitud de onda en azul λ_3), donde dichos rayos tienen la misma intensidad luminosa. Además, la longitud de onda

del rojo λ_1 es sustancialmente igual a 700,0 nm, la longitud de onda del verde λ_2 es sustancialmente igual a 546,1 nm, y la longitud de onda del azul λ_3 es sustancialmente igual a 435,8 nm. Aquí la expresión “sustancialmente” se interpretará como igual o comprendida dentro un rango de variación de $\pm 1\%$. En este contexto, el valor de generación λ_g de la longitud del haz de referencia (3) y el haz objeto (4) está comprendido entre una cota superior y una cota inferior, donde la cota superior es igual a 470 nm y la cota inferior es igual a 400 nm.

Por otra parte, en la Figura 1 el tamaño de la sección transversal del haz de referencia (3) es controlado por medio de un diafragma (9), mientras el tamaño de la sección transversal del haz objeto (4), antes de pasar por la lente analógica (1), es controlado por medio de otro diafragma (9'). Por ejemplo, los diafragmas (9, 9') pueden fijar el tamaño de dichas secciones transversales, de manera que el diámetro de las mismas es igual a 1,5 cm. Ventajosamente, cuando la lente holográfica (1a) generada se emplea posteriormente en un sistema de guiado de luz, los diafragmas (9, 9') permiten ajustar previamente la sección transversal de los haces (3, 4) al tamaño de la imagen que genera el proyector de imagen comprendido en dicho sistema de guiado de luz.

En otras realizaciones del método, la lente holográfica (1a) generada es una lente holográfica (1a) de reflexión. De nuevo, en el método se genera ventajosamente una lente holográfica (1a) sin la utilización de prismas ópticos.

La Figura 2 muestra una representación esquemática del método de generación de una lente holográfica (1a) convergente de reflexión, de acuerdo con una realización preferente de la presente invención. Ciertamente, la Figura 2 presenta los mismos elementos que la Figura 1, pero dispuestos para generar una lente holográfica (1a) convergente de reflexión, en lugar de una lente holográfica (1a) convergente de transmisión. Así pues, en la Figura 2, el haz de referencia (3) incide en el material fotosensible (2), al menos parcialmente, por su primera superficie exterior (5), mientras el haz objeto (4) incide en el material fotosensible (2), al menos parcialmente, por su segunda superficie exterior (6).

Por otro lado, la primera superficie exterior (5) del material fotosensible (2) está dispuesta sobre una cara exterior (7a) del sustrato (7). En particular, dicha cara exterior (7a) es la opuesta a la cara exterior (7a) sobre la que está dispuesta la segunda superficie exterior (6) del material fotosensible (2) en la Figura 1. Además, a diferencia de los métodos de generación de lentes holográficas de reflexión que utilizan prismas ópticos, el material

fotosensible (2) está embebido en el medio (8), y la segunda superficie exterior (6) del mismo está en contacto con dicho medio (8). Además, el haz de referencia (3), antes de incidir en el material fotosensible (2), se propaga por el medio (8) con un ángulo igual a un primer valor angular, θ_1 , con respecto a la normal a la primera superficie exterior (5).

- 5 Posteriormente, dicho haz de referencia (3) atraviesa el sustrato (7) hacia la primera superficie exterior (5) del material fotosensible (2). Por otra parte, antes de incidir en el material fotosensible (2), el haz objeto (4) se propaga en el medio (8) con un ángulo igual a un segundo valor angular, θ_2 , con respecto a la normal a la primera superficie exterior (5) del material fotosensible (2). Es más, la incidencia por la segunda superficie exterior (6) del haz
10 objeto (4) es tal que atraviesa dicha segunda superficie exterior (6) refractándose desde el medio (8) hacia el interior del material fotosensible (2).

- De manera análoga a la generación de una lente holográfica (1a) de transmisión, el tercer índice de refracción n_g , el valor de generación λ_g , el primer valor angular θ_1 , y el segundo
15 valor angular θ_2 fijan el vector de red $\vec{K}$ que caracteriza el patrón de interferencia, de modo que la lente holográfica (1a) de reflexión generada en la Figura 2 está configurada para difractar, hacia el interior del sustrato (7), un rayo de luz de reconstrucción (10a) límite. Dicho rayo de reconstrucción límite incide por la primera superficie exterior (5) de la lente holográfica (1a). Sin embargo, como la lente holográfica (1a) generada en la Figura 2 es una
20 lente holográfica (1a) de reflexión, el rayo de luz difractado (7b) límite resultante atraviesa la primera superficie exterior (5) de la misma, en lugar de la segunda superficie exterior (6). Así pues, el rayo de luz difractado (7b) límite atraviesa dicha primera superficie exterior (5) por un punto de la misma, formando un ángulo límite θ_{lim} igual al ángulo crítico de reflexión total, respecto a la dirección perpendicular en el punto atravesado. Nuevamente, a diferencia de
25 los métodos que utilizan prismas ópticos, el valor límite λ_{lim} es distinto del valor de generación λ_g .

- En el contexto anterior, la lente holográfica (1a) de reflexión generada en la Figura 2 está configurada para guiar, hacia el interior del sustrato (7), un rayo de prueba que incide en la
30 primera superficie exterior (5) de la misma, de manera análoga a la lente holográfica (1a) generada en la Figura 1. Dicho rayo de prueba incide con un ángulo respecto a la normal a la primera superficie exterior (5) mayor o igual que el del rayo de reconstrucción límite, y su respectivo vector de red $\vec{K}_p$ es igual al vector de red $\vec{K}$ que caracteriza el patrón de interferencia. El ángulo que forma el rayo de luz difractado (7b) resultante, en el interior del
35 sustrato (7) y respecto a la dirección perpendicular en el punto que atraviesa de la superficie

exterior de lente holográfica (1a), es mayor que el ángulo límite θ_{lim} . Sin embargo, a diferencia de la realización de la Figura 1, el punto que atraviesa dicho rayo de luz difractado (7b) es un punto de la primera superficie exterior (5). Además, también a diferencia de la realización de la Figura 1, el valor de la longitud de onda del rayo de prueba es menor que el valor de la longitud de onda del rayo de reconstrucción límite.

Asimismo, la lente holográfica (1a) de reflexión generada en la Figura 2, también está configurada para guiar hacia el exterior del sustrato (7) otro rayo de prueba. Dicho rayo de prueba incide en la lente holográfica (1a) desde el interior del sustrato (7), formando un ángulo de incidencia en el interior del mismo mayor o igual que el ángulo límite θ_{lim} , respecto a la dirección perpendicular en el punto atravesado por el rayo de prueba en la superficie exterior de la lente holográfica (1a). El vector de red $\vec{K}_p$ de dicho rayo de prueba es igual al vector de red $\vec{K}$ que caracteriza el patrón de interferencia, y el rayo difractado resultante forma un ángulo mayor o igual al formado por el rayo de reconstrucción límite, respecto a la normal a la primera superficie exterior (5). Sin embargo, a diferencia de la realización de la Figura 1, el rayo de prueba incide en la lente holográfica (1a) por la primera superficie exterior (5) de la misma, y su longitud de onda es igual o menor que la del rayo de reconstrucción límite. Así pues, el rayo difractado resultante, tras atravesar la primera superficie exterior (5) de la lente holográfica (1a), se propaga por el interior del sustrato (7) y sale hacia el medio (8) en el que está embebido dicho sustrato (7).

En una realización preferente del método de la Figura 2, el tercer índice de refracción n_g , el valor de generación λ_g , el primer valor angular θ_1 , y el segundo valor angular θ_2 son tales que el rayo de luz de reconstrucción (10a) límite incide en la lente holográfica (1a) de reflexión generada por su primera superficie exterior (5), de manera sustancialmente perpendicular a la misma. La expresión “sustancialmente” dependerá del grosor de la lente holográfica (1a), de igual manera que en las realizaciones en las que se genera una lente holográfica (1a) de transmisión.

A continuación, se expone un ejemplo con valores numéricos, donde la lente holográfica (1a) de reflexión generada en la Figura 2 guía hacia el interior/exterior del sustrato (7) rayos de longitud de onda menores o iguales que 482 nm (esto es, longitud de onda del color azul). Las direcciones de dichos rayos satisfacen la condición angular requerida para de reflexión total en el interior del sustrato (7). Asimismo, dichos rayos atraviesan perpendicularmente la primera superficie exterior (5) de la lente holográfica (1a). Se toman los mismos valores numéricos del valor de generación λ_g , el segundo índice de refracción n_a ,

y el tercer índice de refracción n_g que en el ejemplo de la Figura 1 (esto es, 532 nm, 1 y 1,478 respectivamente). Además, el primer valor angular θ_1 y el segundo valor angular θ_2 son respectivamente iguales a 60° y -30° . Así, el valor límite λ_{lim} del rayo de luz de reconstrucción (10a) límite que incide en la lente holográfica (1a) generada, de manera perpendicular a su primera superficie exterior (5), es igual a 482 nm. Por otro lado, si de nuevo se toma que el valor del primer índice de refracción n_v (esto es, el del sustrato (7)) es igual a 1,5, el valor angular límite θ_{lim} es otra vez igual a $41,8^\circ$.

Las lentes holográficas generadas en las Figuras 1 y 2 son lentes holográficas convergentes con una distancia focal. En este contexto, la lente analógica (1) convergente comprende un centro óptico (1b) y tiene una distancia focal igual a un valor focal f . Asimismo, el centro óptico (1b) de la lente analógica (1) está situado a una distancia, h , del centro geométrico (2a) del material fotosensible (2). Cuando los haces (3, 4) de referencia y objeto interfieren en el material fotosensible (2), de manera que el patrón de interferencia registrado en dicho material fotosensible (2) está centrado respecto al centro geométrico (2a) del mismo, el centro geométrico (2a) del material fotosensible (2) coincide con el centro óptico (1b) de la lente holográfica (1a) generada con dicho material fotosensible (2). Así, la distancia focal de la lente holográfica (1a) convergente generada viene dada por la diferencia entre el valor focal f de la lente analógica (1), y la distancia h de separación entre el centro óptico (1b) de la lente analógica (1) y el centro geométrico (2a) del material fotosensible (2). Por ejemplo, si la lente analógica (1) tiene un valor focal f igual a 15 cm, y la distancia h de separación entre el centro óptico (1b) de la lente analógica (1) y el centro geométrico (2a) del material fotosensible (2) es igual a 5 cm, la distancia focal de la lente holográfica (1a) convergente generada es igual a 10 cm. En otras realizaciones de la invención, la lente holográfica (1a) generada es una lente holográfica (1a) divergente. Para ello, una opción es reemplazar la lente analógica (1) convergente por una divergente. En tal caso, la distancia focal de la lente holográfica (1a) divergente generada es igual a la suma de la distancia focal de la lente analógica (1) divergente, y la distancia h entre el centro óptico (1b) de la lente analógica (1) y el centro geométrico (2a) del material fotosensible (2).

Por otro lado, en algunas realizaciones, el patrón de interferencia registrado en el material fotosensible (2) de las Figuras 1 y 2 es estabilizado tras la generación de la lente holográfica (1a). De esta manera, el material fotosensible (2) no cambia sus propiedades cuando posteriormente incide luz en el mismo, tras registrar el patrón de interferencia. Por ejemplo, en realizaciones donde el material fotosensible (2) está compuesto, al menos parcialmente, por fotopolímeros, la estabilización del patrón de interferencia comprende curar el material

fotosensible (2) con luz blanca y/o ultravioleta. Ello permite eliminar monómeros que no registran patrón de interferencia. Otras formas de estabilizar el patrón de interferencia aplicables a fotopolímeros u otro tipo de materiales fotosensibles (2) son conocidos por el experto en la materia.

5

En una realización preferente del método, el material fotosensible (2) está compuesto, al menos parcialmente, por uno o más fotopolímeros, como por ejemplo el fotopolímero comercial Bayfol hx 200. En otras realizaciones, el material fotosensible (2) está compuesto, al menos parcialmente, por fotorresinas, gelatinas dicromatadas, y/u otros materiales conocidos por el experto en la materia.

10

En realizaciones no limitativas, el material fotosensible (2) empleado en el método es un material de fase. En otras realizaciones no limitativas, el material fotosensible (2) es un material de amplitud.

15

En una realización preferente, el tercer índice de refracción n_g es igual o mayor que 0,9 veces el primer índice de refracción n_v , y menor igual que 1,1 veces el primer índice de refracción n_v . Cuando la desviación del índice de refracción n_g del material fotosensible (2) respecto al índice de refracción n_v del sustrato (7) no es mayor que un $\pm 10\%$, la lente holográfica (1a) generada es más eficaz a la hora de guiar la luz hacia el interior/exterior del sustrato (7).

20

En una realización preferente, el valor de la resolución del material fotosensible es igual o menor que $0,5 \mu\text{m}$. Preferiblemente, en la generación de una lente holográfica (1a) de reflexión, el material fotosensible (2) tiene un valor de resolución igual o menor que $0,2 \mu\text{m}$.

25

Un valor de resolución igual a $0,5 \mu\text{m}$ equivale a ser capaz de registrar una densidad de franjas de interferencia aproximadamente igual a dos mil franjas por milímetro de material fotosensible (2). Por otro lado, un valor de resolución igual a $0,2 \mu\text{m}$ equivale a ser capaz de registrar una densidad de franjas de interferencia aproximadamente igual a cinco mil franjas por milímetro de material fotosensible (2). En el contexto de la presente invención, las franjas son los máximos y mínimos del patrón de interferencia registrado en el material fotosensible (2).

30

Por otro lado, en realizaciones preferentes de la invención, el grosor del material fotosensible (2) entre la primera superficie exterior (5) y la segunda superficie exterior (6) está comprendido entre $5 \mu\text{m}$ y $20 \mu\text{m}$, y más preferentemente, entre $10 \mu\text{m}$ y $15 \mu\text{m}$. En el contexto de la presente invención, el grosor del material fotosensible (2) es el que éste tiene

35

cuando incide luz en el mismo. Por ejemplo, como es sabido, si el material fotosensible (2) es un material de fase, su grosor en ocasiones es diferente cuando incide luz en dicho material fotosensible (2) a cuando no incide luz en él. Dicha diferencia puede llegar a ser una reducción del grosor menor que un 5%. Por otro lado, si el material fotosensible (2) es un material de amplitud, el grosor es el mismo incida o no luz en el material fotosensible (2). Asimismo, en las realizaciones en las que el método incluye el paso de estabilizar el patrón de interferencia, el grosor del material fotosensible (2) de la lente holográfica (1a) generada apenas difiere del grosor anterior a la realización de dicho paso. Por ejemplo, cuando la estabilización implica el curado del material fotosensible (2), el grosor puede reducirse en menos de un 1%. Con todo, con los anteriores rangos de grosores del material fotosensible (2), la lente holográfica (1a) generada con el método de la invención es típicamente un EOH de volumen. Un EOH de volumen es aquel que, cuando incide un haz en el mismo, dicho EOH no divide el haz incidente en más de dos haces.

Asimismo, en realizaciones preferentes del método de la invención, al menos una de las superficies exteriores (5, 6) del material fotosensible (2) tiene propiedades adhesivas. Por ejemplo, en las realizaciones de las Figuras 1 y 2, las superficies del material fotosensible (2) que están dispuestas en el sustrato (7) (la segunda superficie exterior (6) en la Figura 1, y la primera superficie exterior (5) en la Figura 2), tienen preferentemente propiedades adhesivas, para mantenerse en tal disposición.

En otras realizaciones de la invención se emplean medios de sujeción alternativos al sustrato (7) (por ejemplo, un bloque neutro, pinzas, etc.), para evitar que el material fotosensible (2) se curve indeseablemente durante la generación de la lente holográfica (1a). Típicamente, tras generar la lente holográfica (1a) con el método, se libera la misma de dichos medios de sujeción, y se dispone sobre una cara exterior (7a) del sustrato (7) para formar un sistema de guiado de luz.

Así pues, en una realización alternativa del método se emplea como medio de sujeción un bloque neutro, con al menos una cara exterior (7a), sobre la que se dispone una de las caras exteriores (5, 6) del material fotosensible (2). Además, dicho bloque neutro es transparente y de baja dispersión, esto es, dispersa menos del 10% de la luz que recibe. De esta manera, durante la generación de la lente holográfica (1a) no se pierde coherencia de los haces (3, 4) de referencia y objeto, ni calidad en el patrón de interferencia registrado en el material fotosensible (2). En un ejemplo no limitativo, el bloque neutro tiene la misma forma geométrica que el sustrato (7) de la Figura 1 y la Figura 2, y el material fotosensible

(2) está dispuesto sobre dicho bloque neutro de manera equivalente sobre las caras del bloque neutro.

En realizaciones alternativas del método, se emplea como medio de sujeción una o más pinzas que sostienen el material fotosensible (2). Generalmente, en dichas realizaciones ambas superficies exteriores (5, 6) del material fotosensible (2) están en contacto con el medio (8) en el que está embebido el material fotosensible (2), y los dos haces (3, 4) de referencia y objeto inciden en el material fotosensible (2) refractándose desde el medio (8) hacia el interior del material fotosensible (2).

Otro objeto de la presente invención se refiere a un sistema de guiado de luz que comprende lentes holográficas, donde al menos una de las mismas es generada con un método de acuerdo con la presente invención.

La Figura 3 muestra una representación esquemática de un sistema de guiado de luz (10) de acuerdo con una realización preferente de la invención. Dicho sistema de guiado de luz (10) comprende un proyector de imagen (11), una primera lente holográfica (12), un sustrato de guiado de onda (13) y una segunda lente holográfica (14).

En la presente invención, el proyector de imagen (11) está configurado para generar luz en forma de una primera imagen (15). En particular, en la Figura 3, el proyector de imagen (11) genera la imagen (15) del número tres. Ejemplos no limitativos de proyectores de imagen (11) son los proyectores basados en uno o más moduladores espaciales de luz (en inglés, "Spatial Light Modulators", o SLMs). Existen diversos tipos de proyectores basados en SLMs. Por ejemplo, los proyectores LCD (del inglés, "Liquid Crystal Displays", esto es, pantallas de cristal líquido), tales como los basados en pantallas de cristal líquido sobre silicio (en inglés, "Liquid Crystal on Silicon", o LCoS). Otro ejemplo son los proyectores DLP (del inglés, "Digital Light Processing", esto es, procesamiento digital de luz), tales como los basados en microespejos sobre un DMD (del inglés, "Digital Micromirror Device", esto es, dispositivo de microespejo digital). La fuente de iluminación de los proyectores de imagen (11) basados en SLMs puede ser una o más lámparas halógenas, LEDs, láseres, entre otras. Otros ejemplos no limitativos de proyectores de imagen (11) son los proyectores láser, donde varios haces son deflectados por uno o más espejos a velocidades muy rápidas para dar la sensación de imagen continua.

La primera lente holográfica (12) tiene una distancia focal igual a un primer valor focal f_1 . Asimismo, la segunda lente holográfica (14) tiene una distancia focal igual a un segundo valor focal f_2 . En particular, dichas primera y segunda lentes (12, 14) de la Figura 3 son lentes holográficas de transmisión.

5

Además, el sustrato de guiado de onda (13) comprende una porción de entrada (16), una porción central (17) y una porción de salida (18). A su vez, el sustrato de guiado de onda (13) comprende una primera cara exterior (7a) (19) y una segunda cara exterior (7a) (20) opuesta a dicha primera cara exterior (7a) (19). La primera lente holográfica (12) está dispuesta sobre la primera cara exterior (7a) (19) del sustrato de guiado de onda (13) en su porción de entrada (15), mientras que la segunda lente holográfica (14) está dispuesta sobre la primera cara exterior (7a) (19) del sustrato de guiado de onda (13) en su porción de salida (18). Por otro lado, el sustrato de guiado de onda (13) está preferentemente compuesto por uno o más materiales tales como vidrio, plástico, entre otros, de manera que dicho sustrato de guiado de onda (13) es transparente.

15

En este contexto, el proyector de imagen (11) está configurado para dirigir la luz que genera hacia la primera lente holográfica (12). Dicha luz incide en la primera lente holográfica (12), por la primera superficie exterior de la misma, esto es, la superficie exterior por la que incide el haz de referencia en el material fotosensible durante la generación dicha primera lente holográfica (12). La primera lente holográfica (12) está configurada para guiar la luz que recibe del proyector de imagen (11), hacia el interior de la porción de entrada (16) del sustrato de guiado de onda (13). Asimismo, la porción central (17) está configurada para guiar en su interior la luz guiada por la primera lente holográfica (12), desde la porción de entrada (16) hasta la porción de salida (18). La segunda lente holográfica (14) está configurada para recibir la luz guiada hasta la porción de salida (18) por la porción central (17). Además, la segunda lente holográfica (14) está configurada para guiar dicha luz que recibe hacia el exterior de la porción de salida (18) del sustrato de guiado de onda (13). Así, la luz guiada por la segunda lente holográfica (14) hacia el exterior de la porción de salida (18) del sustrato de guiado de onda (13), contiene información de la primera imagen (15) generada por el proyector de imagen (11).

25

30

Por otro lado, la primera lente holográfica (12), la segunda lente holográfica (14) y el sustrato de guiado de onda (13) están configurados para que dicho sustrato de guiado de onda (13) guíe en su interior por reflexión total la luz generada por el proyector de imagen (11). En este sentido, el sistema de guiado de luz (10) se encuentra embebido en un medio (por

35

ejemplo, aire, agua, entre otros) con un índice de refracción menor que el del sustrato de guiado de onda (13), de manera que dicha reflexión total tiene lugar en el interior del sustrato de guiado de onda (13). Así, cada rayo de la luz guiada en el interior del sustrato de guiado de onda (13) incide en un punto de la superficie de separación entre dicho sustrato de guiado de onda (13) y el medio en el que está embebido el mismo, con un ángulo de incidencia respecto a la dirección perpendicular en dicho punto mayor que el ángulo crítico de reflexión total. El ángulo crítico de reflexión total es igual al arcoseno del cociente entre el índice de refracción del medio en el que está embebido el sustrato de guiado de onda (13) y el índice de refracción del sustrato de guiado de onda (13). En la Figura 3 (y en la posterior Figura 4) se ha representado en el interior del sustrato de guiado de onda (13) un rayo de la luz guiada por reflexión total, para ilustrar lo anteriormente descrito.

Al propagarse por reflexión total en el interior del sustrato de guiado de onda (13) la luz generada por el proyector de imagen (11), no se pierde información de la primera imagen (15) en dicha propagación. Así, a partir de la luz guiada por la segunda lente holográfica (14) hacia el exterior de la porción de salida (18) del sustrato de guiado de onda (13), se reproduce correctamente, con una segunda imagen (21), la primera imagen (15) generada por el proyector de imagen (11).

Así pues, la primera lente holográfica (12) y/o la segunda lente holográfica (14) del sistema de guiado de luz (10) son ventajosamente generadas con un método de acuerdo con el primer objeto de la invención. Ello permite reducir los costes y tiempos de producción en masa del sistema de guiado la luz (10), en comparación con los sistemas de guiado de luz que comprenden lentes holográficas generadas con métodos que utilizan prismas ópticos. Preferentemente, ambas lentes holográficas (12, 14) son generadas en un método de acuerdo con la presente invención. Por ejemplo, dichas lentes holográficas (12, 14) pueden ser generadas de manera que el sustrato de guiado de onda (13) guía por reflexión total en su interior la luz del proyector de imagen (11) para longitudes de onda mayores que un valor límite λ_{lim} particular.

La primera lente holográfica (12) de la Figura 3 es una lente holográfica (1a) convergente, lo que facilita que todos los rayos de la luz guiada por dicha primera lente holográfica (12) lleguen por reflexión total desde la porción de entrada (16) hasta la porción de salida (18). En otras realizaciones de la invención, dicha primera lente holográfica (12) es divergente. Por otro lado, la segunda lente holográfica (14) de la Figura 3 es una lente holográfica (1a) convergente. En este sentido, se han representado en la Figura 3 los dos rayos de luz más

externos de la luz guiada por la segunda lente holográfica (14) hacia el exterior de la porción de salida (18) del sustrato de guiado de onda (13).

Según lo descrito anteriormente, en la realización de la Figura 3, el sistema de guiado de luz (10) comprende adicionalmente una pantalla (22). En particular, dicha pantalla (22) se encuentra delante de la primera cara exterior (7a) (19) del sustrato de guiado de onda (13), frente de la segunda lente holográfica (14). La segunda lente holográfica (14) está configurada para guiar la luz que recibe del interior del sustrato de guiado de onda (13) hacia la pantalla (22), de manera que se proyecta en dicha pantalla (22) la segunda imagen (21). Dicha segunda imagen (21) es una reproducción de la primera imagen (15) generada por el proyector de imagen (11). En una realización preferente, la pantalla (22) es, al menos parcialmente, transparente. Ello permite ver la segunda imagen (21) en la pantalla (22), a la vez que se ve, al menos parcialmente, todo aquello que existe tras la pantalla (22). En ejemplos no limitativos, la pantalla (22) es la luna de un vehículo (coche, tren, avión, barco, cohete, entre otros) de un dispositivo de visión de AR que comprende el sistema de guiado de luz (10) de la Figura 3.

Por otro lado, el sistema de guiado de luz (10) de la Figura 3 es ventajosamente un sistema 4f. De este modo, la segunda imagen (21) queda perfectamente enfocada en la pantalla (22). Así pues, la primera lente holográfica (12) comprende un centro óptico (1b), la segunda lente holográfica (14) comprende otro centro óptico (1b), y la distancia entre el centro óptico (1b) de la primera lente holográfica (12) y el centro óptico (1b) de la segunda lente holográfica (14) es sustancialmente igual a la suma del primer valor focal f_1 de la primera lente holográfica (12) y el segundo valor focal f_2 de la segunda lente holográfica (14). Asimismo, el proyector de imagen (11) comprende un plano imagen (15a), donde dicho plano imagen (15a) está situado a una distancia del centro óptico (1b) de la primera lente holográfica (12) sustancialmente igual al primer valor focal f_1 . Además, la pantalla (22) y, en consecuencia, la segunda imagen (21) proyectada en la misma están situadas a una distancia del centro óptico (1b) de la segunda lente holográfica (14) sustancialmente igual al segundo valor focal f_2 . En este contexto, la expresión “sustancialmente” se interpretará como igual o comprendida dentro de un rango de variación de $\pm 0,5\%$. Dicho rango de variación en una o más de las distancias entre los elementos que definen el sistema 4f, supone un desenfoque en la segunda imagen (21) inapreciable para un ojo humano.

El plano imagen (15a) del proyector de imagen (11) es el plano donde el proyector de imagen (11) genera la primera imagen (15). Preferentemente, la distancia del plano imagen

(15a) del proyector de imagen (11) al centro geométrico (2a) de la primera lente holográfica (12) se mide desde el centro de la primera imagen (15) formada en dicho plano imagen (15a). Por ejemplo, en una realización no limitativa, el proyector de imagen (11) está basado en una única pantalla de cristal líquido sobre silicio (LCoS), donde el plano imagen (15a) es el que contiene el propio LCoS dentro del proyector de imagen (11). En dicha realización, generalmente, el centro de la primera imagen (15) coincide con el propio centro geométrico (2a) del LCoS.

En otras realizaciones de la invención, el sistema de guiado de luz (10) no es un sistema 4f, de manera que al menos una de las distancias anteriores entre los elementos del sistema de guiado de luz (10) es diferente de los valores descritos anteriormente.

La Figura 4 muestra una representación esquemática de un sistema de guiado de luz (10) de acuerdo con otra realización preferente de la invención. Dicho sistema de guiado de luz (10) también comprende un proyector de imagen (11), una primera lente holográfica (12) de transmisión, un sustrato de guiado de onda (13) y una segunda lente holográfica (14) de transmisión.

Como en la Figura 3, el sistema de guiado de luz (10) de la Figura 4 guía la luz generada por el proyector de imagen (11) de modo que, tras ser guiada primeramente por la primera lente holográfica (12) hacia el interior del sustrato de guiado de onda (13), y posteriormente por reflexión total en el interior del sustrato de guiado de onda (13), dicha luz es guiada hacia el exterior del sustrato de guiado de onda (13) por medio de la segunda lente holográfica (14).

Sin embargo, a diferencia de la realización de la Figura 3, la segunda lente holográfica (14) de transmisión es una lente holográfica (1a) divergente, y el sistema de guiado de luz (10) carece de una pantalla (22). En efecto, en el sistema de guiado de luz (10) de la Figura 4 la luz generada por el proyector de imagen (11) es guiada hacia el ojo (23) de un usuario, en lugar de hacia una pantalla (22). Así, la segunda lente holográfica (14) está configurada para recibir la luz guiada hasta la porción de salida (18) por la porción central (17), y para guiar dicha luz recibida hacia el ojo (23) del usuario situado en el exterior del sustrato de guiado de onda (13). Se han representado en la Figura 4 los dos rayos más externos de la luz guiada por la segunda lente holográfica (14) hacia el ojo (23) del usuario. Dicho usuario ve la segunda imagen (21) que reproduce la primera imagen (15) generada por el proyector de imagen (11). Concretamente, en la Figura 4 la segunda imagen (21) es una imagen virtual

que el usuario ve a través del sustrato de guiado de onda (13), situada en el exterior del mismo y delante de su segunda cara exterior (7a) (20). En ejemplos no limitativos, el sistema de guiado de luz (10) de la Figura 4 está comprendido en unas gafas o un casco inteligentes de AR, donde el usuario de dichas gafas o casco ve, a través del sustrato de guiado de onda (13), el mundo exterior y la segunda imagen (21) superpuesta en el mismo.

La realización de la Figura 4 es ventajosamente un sistema 4f, de manera que el ojo (23) del usuario enfoca perfectamente la segunda imagen (21). Así, de manera análoga a la realización de la Figura 3, la distancia entre el centro óptico (1b) de la primera lente holográfica (12) y el centro óptico (1b) de la segunda lente holográfica (14) es sustancialmente igual a la suma del primer valor focal f_1 de la primera lente holográfica (12) y el segundo valor focal f_2 de la segunda lente holográfica (14), el plano imagen (15a) del proyector de imagen (11) está situado a una distancia del centro óptico (1b) de la primera lente holográfica (12) sustancialmente igual al primer valor focal f_1 , y, gracias al cristalino del ojo (14) del usuario que actúa como lente convergente, el usuario ve la segunda imagen (21) a una distancia del centro óptico (1b) de la segunda lente holográfica (14) sustancialmente igual al segundo valor focal f_2 . De nuevo, la expresión “sustancialmente” se interpretará en este contexto como igual o comprendida dentro de un rango de variación de $\pm 0,5\%$.

En realizaciones alternativas a la de la Figura 4, la segunda lente holográfica (14) que guía la luz hacia el ojo de un usuario (23) es una lente holográfica (1a) convergente. Así, para que el usuario vea la segunda imagen (21) virtual, el punto próximo del usuario tiene que estar situado en el espacio que hay entre el sustrato de guiado de onda (13) y el ojo (23) del usuario. Como es sabido, el punto próximo de un usuario es un punto situado a la distancia más próxima al ojo (23) del usuario, donde dicho usuario ve con claridad y acomodación perfecta un objeto. Por ejemplo, para una persona menor de 40 años dicha distancia es típicamente igual 10 cm. En estas condiciones, el usuario ve la segunda imagen (21) a una distancia sustancialmente igual al segundo valor focal f_2 , en el exterior del sustrato de guiado de onda (13) y delante de la primera cara exterior (7a) (19) del mismo. De nuevo, la expresión “sustancialmente” se interpretará aquí como igual o comprendida dentro de un rango de variación de $\pm 0,5\%$.

Por otro lado, en los sistemas 4f el escalado final de la segunda imagen (21) es directamente proporcional, respecto a la primera imagen (15), al cociente entre el segundo valor focal f_2 de la segunda lente holográfica (14) y el primer valor focal f_1 de la primera lente holográfica (12). Así, en las realizaciones de las Figuras 3 y 4, el segundo valor focal f_2 de la

segunda lente holográfica (14) es menor que el primer valor focal f_1 de la primera lente holográfica (12), de manera que el tamaño de la segunda imagen (21) es menor que el tamaño de la primera imagen (15).

- 5 Según lo anteriormente descrito, en realizaciones preferentes de la invención, el segundo valor focal f_2 de la segunda lente holográfica (14) es mayor que el primer valor focal f_1 de la primera lente holográfica (12), de manera que el tamaño de la segunda imagen (21) es mayor que el tamaño de la primera imagen (15). Esto permite reducir las dimensiones y el peso del proyector de imagen (11), sin afectar negativamente al tamaño de la segunda
10 imagen (21) que reproduce la primera imagen (15) generada por dicho proyector de imagen (11).

- Otras realizaciones del sistema de guiado de luz (10) de acuerdo con la presente invención son deducibles por un experto en la materia, a partir del contenido del presente documento.
- 15 En ejemplos no limitativos, los sistemas de guiado de luz (10) comprenden dos lentes holográficas (12, 14) de reflexión en lugar de dos lentes holográfica (12, 14) de transmisión, donde dichas lentes holográficas (12, 14) están dispuestas sobre la segunda cara exterior (7a) (20) del sustrato de guiado de onda (13) en lugar de sobre la primera cara exterior (7a) (19) del mismo. En estos ejemplos, cuando el proyector de imagen (11) dirige la luz que
20 genera hacia la primera lente holográfica (12), típicamente dicha luz incide en la primera lente holográfica (12) por la primera superficie exterior de la misma, después de atravesar el interior del sustrato de guiado de onda (13) por la porción de entrada (16) del mismo. Así, la primera lente holográfica (12) recibe la luz generada por el proyector de imagen (11) y la introduce de nuevo en el interior del sustrato de guiado de onda (13) en la porción de
25 entrada (16) del mismo. Asimismo, la segunda lente holográfica (14) recibe la luz guiada hasta la porción de salida (18) por la porción central (17), y guía dicha luz que recibe hacia el exterior de la porción de salida (18), de manera que, antes de la salir del interior del sustrato de guiado de onda (13), atraviesa el interior de dicho sustrato de guiado de onda (13) por la porción de salida (18) del mismo.

- 30 En otras realizaciones no limitativas de la invención, el sistema de guiado de luz (10) comprende lentes holográficas (12, 14), donde una es una lente holográfica (1a) de transmisión y la otra es una lente holográfica (1a) de reflexión. Asimismo, en otras realizaciones de la invención, la primera lente holográfica (12) está dispuesta en una cara exterior (7a) (19, 20) del sustrato de guiado de onda (13) distinta de la cara exterior (7a) (19, 20) sobre la que está dispuesta la segunda lente holográfica (14), y el proyector de imagen
35

(11) y la pantalla (22) o el ojo (23) del usuario se encuentran en lados opuestos respecto al sustrato de guiado de onda (13).

Por otra parte, preferentemente la disposición de la primera lente holográfica (12) y la segunda lente holográfica (14) es tal que no hay aire entre dichas lentes holográficas (12, 14) y el sustrato de guiado de onda (13). En realizaciones de la invención, el material fotosensible de las primera y/o segunda lentes holográficas (12, 14) es tal que las superficies de dichas lentes holográficas (12, 14) que están en contacto con el sustrato de guiado de onda (13) tienen propiedades adhesivas. Esto les permite mantenerse dispuestas sobre las caras exteriores (19, 20) del sustrato de guiado de onda (13). Otras formas de disponer las lentes holográficas (12, 14) sobre las caras exteriores (19, 20) del sustrato de guiado de onda (13) son conocidas por el experto en la materia. Por ejemplo, se puede utilizar un pegamento o silicona transparentes, con un índice de refracción sustancialmente igual al del sustrato de guiado de onda (13). En este contexto, la expresión “sustancialmente” se interpretará aquí como igual o comprendida dentro de un rango de variación de $\pm 2\%$.

Asimismo, en realizaciones preferentes de la invención, el proyector de imagen (11) tiene una anchura espectral inferior o igual a 40 nm. Generalmente, 40 nm es la anchura espectral de los proyectores de imagen (11) que comprenden LEDs.

Por otro lado, en otras realizaciones de la invención, el proyector de imagen (11) tiene una resolución suficiente como para preferentemente generar la primera imagen (15) en formato de alta definición (en inglés, “High Definition”, o HD) y/o ultra alta definición (en inglés, “Ultra High Definition”, o UHD). En este contexto, el formato UHD se refiere a resoluciones 4K, 8K, y/o 16K

En realizaciones de la invención, el proyector de imagen (11) está configurado para emitir luz de cualquier combinación de colores de la paleta cromática (por ejemplo, un proyector RGB). En otras realizaciones, el proyector de imagen (11) está configurado para emitir luz monocromática, esto es, para emitir luz de un único color.

Asimismo, en otras realizaciones de la invención, la luz que dirige el proyector de imagen (11) incide en la primera lente holográfica (12) por su primera superficie exterior, de manera sustancialmente perpendicular a la misma. De acuerdo con lo explicado anteriormente, la selectividad angular de la primera lente holográfica (12) depende del grosor de la misma,

siendo tanto más restrictiva la selectividad angular cuanto mayor es ese grosor. Por tanto, la expresión “sustancialmente” dependerá del grosor de dicha primera lente holográfica (12). Así pues, en ejemplos no limitativos, si un rayo de luz incide por un punto de la primera superficie exterior de la primera lente holográfica (12), la expresión “sustancialmente” se interpreta como que la dirección de dicho rayo es paralela a la normal a dicha primera superficie exterior, con un rango de variación respecto a dicha dirección de $\pm 5^\circ$ si el grosor de la primera lente holográfica (12) es de $20\ \mu\text{m}$, o de $\pm 10^\circ$ si dicho grosor es de $5\ \mu\text{m}$. La dirección normal a la primera superficie exterior de la primera lente holográfica (12) se toma como la dirección que define el eje respecto al cual está centrado el patrón de interferencia registrado en el interior del material fotosensible de dicha primera lente holográfica (12). En las Figuras 3 y 4 se ha representado con una línea recta, un rayo de la luz dirigida por el proyector de imagen (11) que incide en la primera lente holográfica (12) por su primera superficie exterior, de manera perpendicular a la misma, de acuerdo con lo descrito anteriormente.

Con todo, el grosor del sustrato de guiado de onda (13) del sistema de guiado de luz (10) no tiene particular relevancia. Dicho grosor únicamente determina el número de reflexiones internas que tienen lugar dentro del sustrato de guiado de onda (13) cuando la luz se propaga por reflexión total en el interior del mismo. Ventajosamente, esto permite fácilmente adaptar el sistema de guiado de luz (10) a las dimensiones particulares de los dispositivos de visión de AR tales como gafas inteligentes, cascos inteligentes, etc.

Por otro lado, el sustrato de guiado de onda (13) no se limita a un sustrato de guiado de onda (13) de caras exteriores (19, 20) planas y paralelas como los de las Figuras 3 y 4. En ejemplos no limitativos, dichas caras exteriores (19, 20) opuestas del sustrato de guiado de onda (13) son curvadas (por ejemplo, un sustrato de guiado de onda (13) convexo o cóncavo). Como se ha descrito anteriormente, las condiciones necesarias para que un rayo de luz se propague por reflexión total en el interior de un sustrato de guiado de onda (13) de cualquier forma geométrica, son conocidas por un experto en la materia. Asimismo, la curvatura de las caras exteriores (19, 20) del sustrato de guiado de onda (13) no influye en los valores de las distancias entre el proyector de imagen (11), las lentes holográficas (12, 14) y la segunda imagen (21) que definen la realización 4f del sistema de guiado de luz (10). En este sentido, en el sistema 4f, el camino óptico de un rayo de luz que se propaga en el interior del sustrato de guiado de onda (13) por reflexión total, desde que es introducido por la primera lente holográfica (12) hasta que es extraído por la segunda lente holográfica (14), es sustancialmente igual al cociente entre la suma del primer valor focal f_1 y el segundo

valor focal f_2 , y el índice de refracción del sustrato de guiado de onda (13), independientemente de la curvatura de las caras exteriores (19, 20) del sustrato de guiado de onda (13). De nuevo, la expresión “sustancialmente” se interpreta aquí como igual o comprendida dentro de un rango de variación de $\pm 0,5\%$.

REIVINDICACIONES

- 1.- Sistema de guiado de luz (10) que comprende, al menos, un proyector de imagen (11) configurado para la generación de luz en forma de una primera imagen (15), y comprende además una primera lente holográfica (12), una segunda lente holográfica (14), y un sustrato de guiado de onda (13) que comprende una porción de entrada (16), una porción central (17) y una porción de salida (18), estando el sistema de guiado de luz (10) **caracterizado por que** el sustrato de guiado de onda (13) comprende, al menos, una primera cara exterior (7a) (19) y una segunda cara exterior (7a) (20) opuesta a dicha primera cara exterior (7a) (19); la primera lente holográfica (12) está dispuesta sobre una de las caras exteriores (19, 20) del sustrato de guiado de onda (13) en su porción de entrada (16); la segunda lente holográfica (14) está dispuesta sobre una de las caras exteriores (19, 20) del sustrato de guiado de onda (13) en su porción de salida (18); el proyector de imagen (11) está configurado para dirigir la luz que genera hacia la primera lente holográfica (12); la primera lente holográfica (12) está configurada para guiar la luz que recibe del proyector de imagen (11), hacia el interior de la porción de entrada (16) del sustrato de guiado de onda (13); la porción central (17) está configurada para guiar en su interior la luz guiada por la primera lente holográfica (12), desde la porción de entrada (16) hasta la porción de salida (18); la segunda lente holográfica (14) está configurada para recibir la luz guiada hasta la porción de salida (18) por la porción central (17), y guiar dicha luz que recibe hacia el exterior de la porción de salida (18) del sustrato de guiado de onda (13); y la primera lente holográfica (12), la segunda lente holográfica (14) y el sustrato de guiado de onda (13) están configurados para que el sustrato de guiado de onda (13) guíe en su interior por reflexión total la luz generada por el proyector de imagen (11), de manera que, a partir de la luz guiada por la segunda lente holográfica (14) hacia el exterior de la porción de salida (18) del sustrato de guiado de onda (13), se reproduce con una segunda imagen (21) la primera imagen (15) generada por el proyector de imagen (11).
- 2.- Sistema de guiado de luz (10) según la reivindicación 1, donde la primera lente holográfica (12) y/o la segunda lente holográfica (14) comprende al menos una de las siguientes: lente holográfica (1a) de transmisión, lente holográfica (1a) de reflexión, lente holográfica (1a) convergente, lente holográfica (1a) divergente.

3.- Sistema de guiado de luz (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-2, donde la segunda lente holográfica (14) está configurada para guiar la luz que recibe del interior del sustrato de guiado de onda (13) hacia una pantalla (22), donde la pantalla (22) es, al menos parcialmente, transparente.

5

4.- Sistema de guiado de luz (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-3, donde la primera lente holográfica (12) comprende un centro óptico (1b) y tiene una distancia focal igual a un primer valor focal f_1 ;

la segunda lente holográfica (14) comprende un centro óptico (1b) y tiene una distancia focal igual a un segundo valor focal f_2 ;

10

la distancia entre el centro óptico (1b) de la primera lente holográfica (12) y el centro óptico (1b) de la segunda lente holográfica (14) es sustancialmente igual a la suma del primer valor focal f_1 y el segundo valor focal f_2 ;

el proyector de imagen (11) comprende un plano imagen (15a), donde dicho plano imagen (15a) está situado a una distancia del centro óptico (1b) de la primera lente holográfica (12) sustancialmente igual al primer valor focal f_1 ;

15

la segunda imagen (21) que reproduce la primera imagen (15) generada por el proyector de imagen (11) está situada a una distancia del centro óptico (1b) de la segunda lente holográfica (14) sustancialmente igual al segundo valor focal f_2 .

20

5.- Sistema de guiado de luz (10) según la reivindicación 4, donde el segundo valor focal f_2 de la segunda lente holográfica (14) es mayor que el primer valor focal f_1 de la primera lente holográfica (12).

25

6.- Sistema de guiado de luz (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-5, donde el proyector de imagen (11) es uno de los siguientes: un proyector basado en uno o más moduladores espaciales de luz, un proyector láser.

7.- Sistema de guiado de luz (10) según la reivindicación 6, donde el proyector de imagen (11) es uno de los siguientes: un proyector LCD, un proyector DLP.

30

8.- Sistema de guiado de luz (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-7, donde el proyector de imagen (11) está configurado para al menos una de la siguientes: generar la primera imagen (15) en formato de alta definición y/o ultra alta definición, emitir luz de cualquier combinación de colores, emitir luz monocromática.

35

9.- Sistema de guiado de luz (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-8, donde el proyector de imagen (11) tiene una anchura espectral inferior o igual a 40 nm.

5 10.- Sistema de guiado de luz (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-9, donde el sustrato de guiado de onda (13) es transparente.

11.- Dispositivo de visión de realidad aumentada que comprende un sistema de guiado de luz (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-10.

10 12.- Dispositivo de visión de realidad aumentada según la reivindicación 11, donde el dispositivo de visión de realidad aumentada comprende uno de los siguientes: unas gafas inteligentes, un casco inteligente, o una luna de un vehículo.

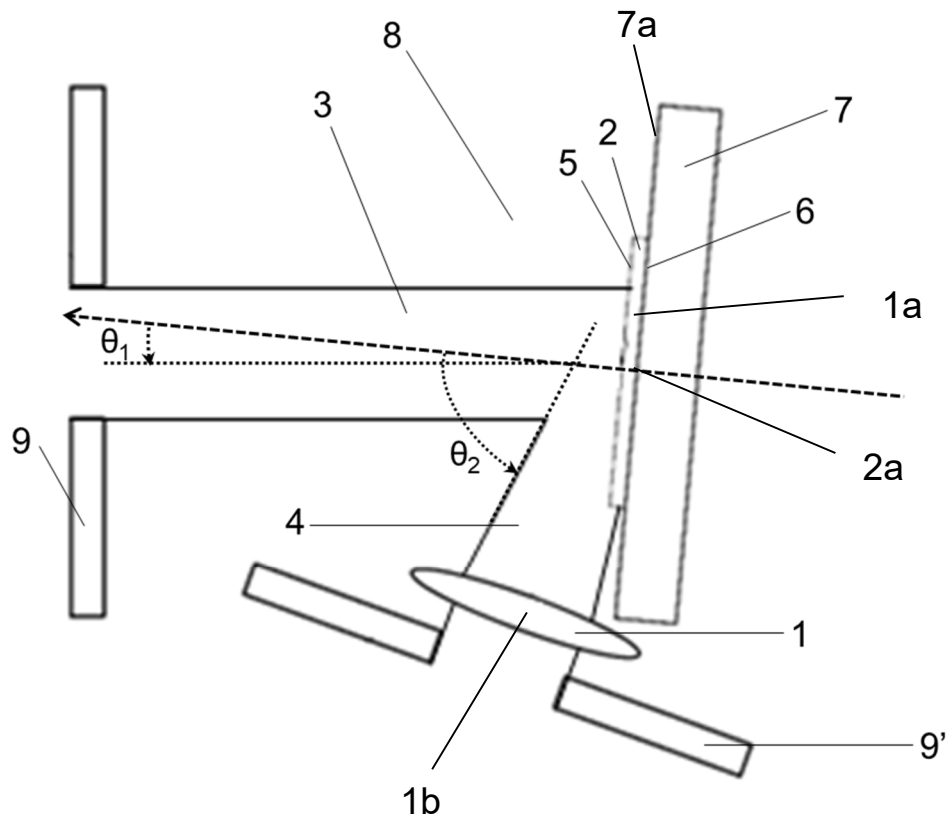


FIG. 1

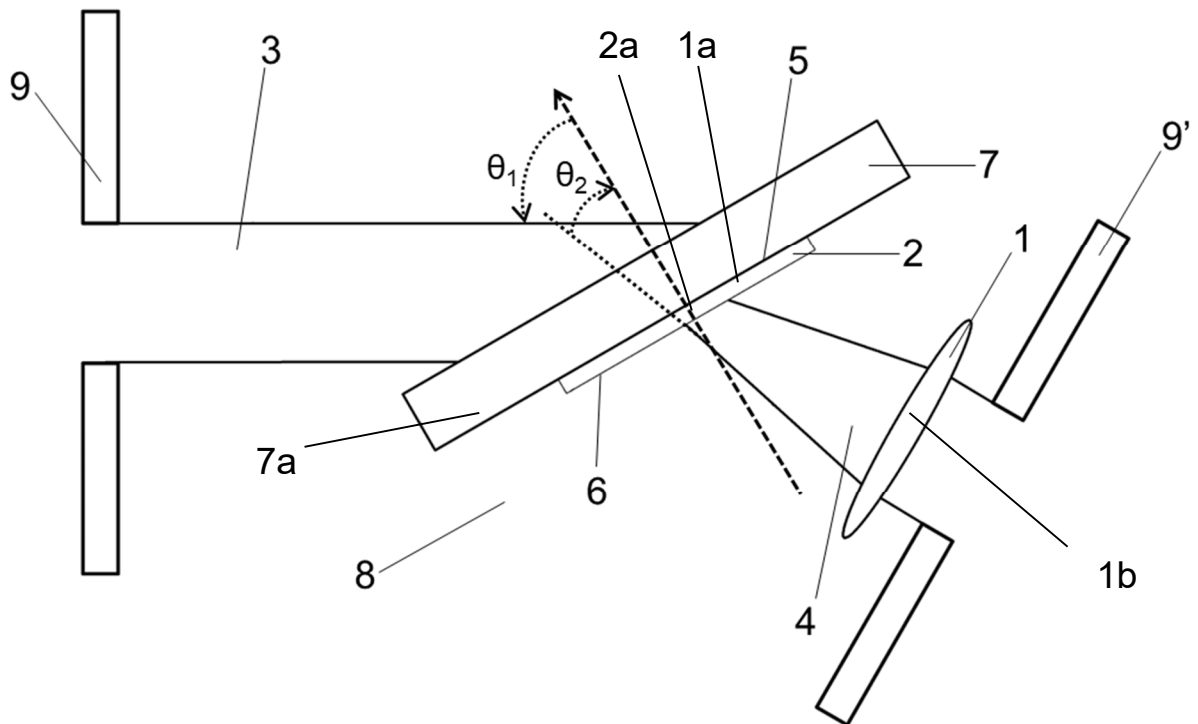


FIG. 2

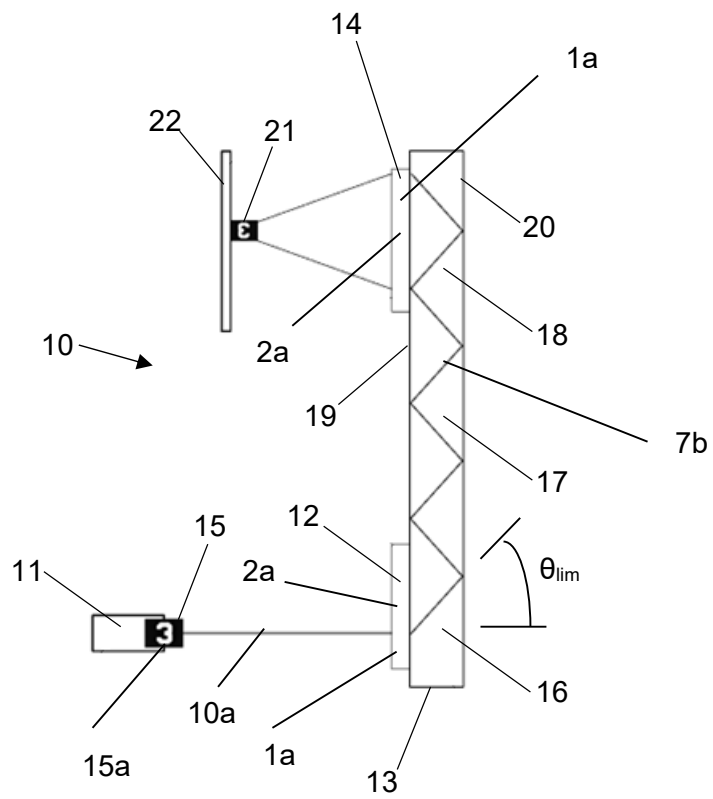


FIG. 3

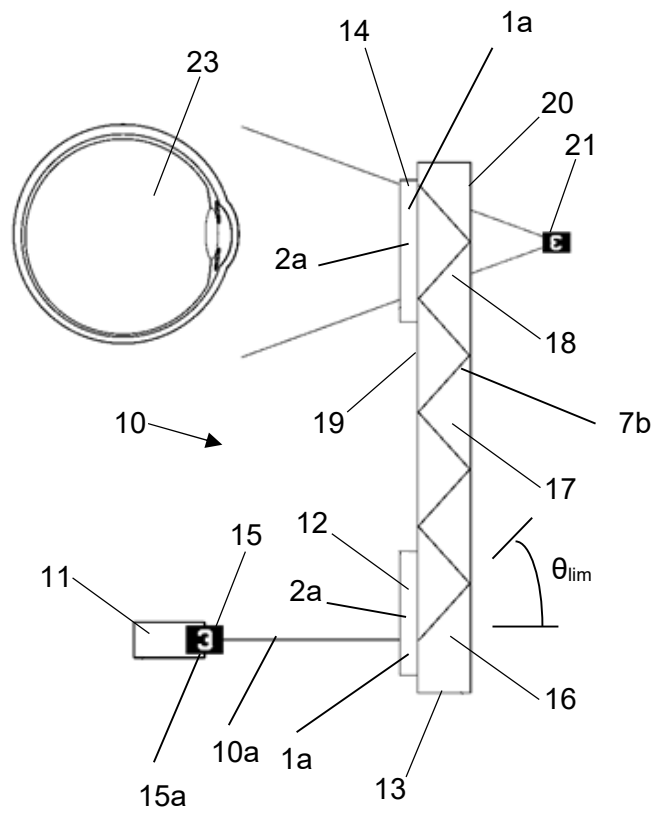


FIG. 4