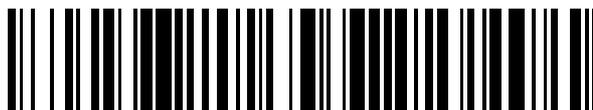


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 670 975**

51 Int. Cl.:

**H01S 5/183** (2006.01)

**H01S 5/14** (2006.01)

**H01S 5/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.12.2014 E 14307037 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.02.2018 EP 3035456**

54 Título: **Dispositivo de láser con haz provisto de un momento angular orbital controlado**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**04.06.2018**

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE (50.0%)  
3, Rue Michel-Ange  
75016 Paris, FR y  
UNIVERSITÉ MONTPELLIER 2 SCIENCES ET  
TECHNIQUES (50.0%)**

72 Inventor/es:

**GARNACHE-CREUILLOT, ARNAUD;  
MYARA, MIKHAEL;  
SAGNES, ISABELLE;  
LE GRATIET, LUC;  
SELLAHI, MOHAMMED;  
SEGHILANI, MOHAMMED y  
LALANNE, PHILIPPE**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 670 975 T3**

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

**DESCRIPCIÓN**

Dispositivo de láser con haz provisto de un momento angular orbital controlado

**Campo de la invención**

5 La presente invención se refiere a dispositivos de láser de emisión superficial con cavidad externa vertical (VeCSEL – Vertical External Cavity Surface Emitting Laser, en inglés) y, más específicamente a la generación de un modo de vórtice de frecuencia única coherente o un modo de vórtice de dos frecuencias con dichos dispositivos.

El campo de la invención es, pero no está limitado a, aplicaciones fotónicas y, de manera más precisa, al manejo óptico de partículas microscópicas, a la manipulación de átomos, a la microscopía de sub-difracción y al procesamiento y la comunicación de información cuántica.

10 **Antecedentes de la invención**

Los haces en fase helicoidal, también llamados vórtices, muestran un frente de onda helicoidal que varía de forma análoga a los tapones roscados a lo largo de la dirección de propagación del haz, con un vector Poynting que sigue una trayectoria de espiral alrededor del eje del haz. Este comportamiento se describe mediante un término de fase acimutal  $e^{iM\theta}$  en la expresión de campo, en la que el factor M se conoce como la carga topológica, que puede ser un valor entero tanto positivo como negativo dependiendo de la dirección de rotación del frente de onda. Este factor significa asimismo que la estructura de fase contiene M hélices entrelazadas. El perfil de intensidad transversal en dichos haces se asemeja a un anillo de luz con un núcleo oscuro en el centro, conocido como modos en forma de rosquilla y, normalmente se supone que pertenece a la base de los modos de eigen Laguerre - Gausiano o Bessel - Gausiano.

20 Se han desarrollado varios métodos bien conocidos para generar haces con frente de onda helicoidal, resumidos en dos grupos distintos:

- El primero consiste en manipular la luz mediante la utilización de óptica externa de transformación de modos, por ejemplo, utilizando un par de lentes cilíndricas para transformar los modos Hermite - Gausiano en los deseados modos Laguerre - Gausiano (LG) con estructura de fase helicoidal, o la utilización de moduladores espaciales de luz o placas de fase de espiral para convertir un rayo láser convencional con frente de onda paralelo en uno exótico que lleva un Momento angular orbital (OAM – Orbital Angular Momentum, en inglés), tal como se describe en el documento US 6.995.351 B2. No obstante, el inconveniente es inherente a la imperfección por pixelación y no linealidad en dichas ópticas, que conduce al deterioro de la coherencia espacial del haz y de la eficiencia de conversión. Además, la potencia está limitada por el umbral de daño de los cristales líquidos en dichos dispositivos y los métodos de transformación del haz son, en general, engorrosos y necesitan alineaciones ópticas rigurosas, lo que hace que la calidad del haz dependa de las condiciones del experimento.

- El segundo enfoque consiste en la generación directa del rayo láser de vórtice, es decir, generar el frente de onda helicoidal dentro de la cavidad óptica mediante la selección de un modo del conjunto de modos de  $LG_{OM}$  gracias a la competencia de ganancia neta modal (gracias a la quema de huecos espaciales (SHB – Spatial Hole Burning, en inglés), un proceso de competencia en modo no lineal). Se realiza, por ejemplo, mediante dos modos ortogonales de bloqueo intracavitaria, o mediante la utilización de un haz de bombeo en forma de anillo. No obstante, el inconveniente es que ambos métodos necesitan elementos intracavitaria (absorbedores, aberturas, ventana de Brewster, etalón ... etc.), lo que conduce a un procedimiento sofisticado de alineación y afecta a la coherencia espacial del haz. Además, la selección de la dirección de rotación del frente de onda no es definitiva ni está comprendida.

El documento PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 8966, del 3 de marzo de 2014, de M. SELLAHI et al, describe "Generation of new spatial and temporal coherent states using VECSEL technology: VORTEX, high order Laguerre - Gauss mode, continuum source".

45 El objetivo de la presente invención es resolver los problemas anteriormente mencionados y, además, dar lugar a algunas otras ventajas.

Un objetivo de la invención es proporcionar la generación directa de láser de modos transversales simétricos rotatorios de alta coherencia.

Otro objetivo de la presente invención es proporcionar fuentes de láser provistas de un momento angular orbital con carga y signo controlados.

50 Otro objetivo de la invención es proporcionar un efecto estable, robusto y controlado de emisión de láser de un modo de un solo vórtice.

Otro objetivo de la presente invención es proporcionar fuentes de láser que logren operaciones de alta potencia.

Otro objetivo de la invención es proporcionar fuentes de láser con un dispositivo integrado.

Otro objetivo de la invención es reducir los costes de fabricación de dichos dispositivos.

### Compendio de la invención

Dichos objetivos se consiguen con un dispositivo de láser para generar una onda óptica en fase con forma helicoidal de acuerdo con la reivindicación 1. El dispositivo de láser comprende (i) una región de ganancia situada entre un primer extremo definido por un primer espejo y un segundo extremo definido por una región de salida, (ii) un segundo espejo, dispuesto de manera que forme con el primer espejo una cavidad óptica (compuesta por ejemplo de espacio libre, material a granel o una guía óptica o guías ópticas que incluyen la región de ganancia y un espacio entre la región de salida y el segundo espejo, y (iii) un medio para bombear la región de ganancia con el fin de generar la onda óptica. El dispositivo de láser de acuerdo con la invención comprende, además, por lo menos, un medio para conformar los perfiles de la intensidad de la luz y/o la fase de la onda óptica y dispuestos para seleccionar, por lo menos, un modo transversal rotatorio - simétrico de la onda óptica, estando elegido dicho modo transversal rotatorio - simétrico de entre aquellos con un índice radial igual a cero y con un índice acimutal que es un número entero con un módulo superior o igual a 1.

Por lo tanto, gracias al dispositivo de acuerdo con la invención es posible controlar la carga y el signo del OAM en una cavidad de láser plano - cóncava perturbando ligeramente la base de eigen transversal rotatoria - simétrica - para romper la simetría del modo en sentido antihorario y elevar la degeneración de la frecuencia óptica - de tal manera que el modo con el signo OAM no deseado es alterado fuertemente, sin afectar significativamente al deseado, haciendo que el resonador de láser sea más favorable para sostener a este último, por ejemplo, mediante la interacción de modo y competencia en la región de ganancia, o el bloqueo de la inyección con una fuente externa. Por lo tanto, una ventaja de la invención es seleccionar algunos modos transversales rotatorios - simétricos particulares que permiten una emisión de láser de vórtice: proporciona generación directa de láser de alta coherencia.

En una realización preferida, los modos transversales rotatorios - simétricos seleccionados son elegidos en la base de eigen de Laguerre - Gauss (LG) o Bessel - Gauss (BG). El índice acimutal puede ser elegido como un no entero, pero conduciría a un modo de funcionamiento no óptimo.

Por lo tanto, la presente invención consiste en seleccionar algunos modos transversales muy específicos, mientras que tanto la base de Laguerre - Gauss como la de Bessel - Gauss incluyen muchos modos transversales. Los que conducen a una onda óptica provista de un momento angular orbital son muy específicos y no son fáciles de aislar. La presente invención está dirigida, en primer lugar, a seleccionar los modos transversales que generan un haz provisto de un momento angular orbital y, en segundo lugar, a controlar su signo y su carga. Tal como se ha descrito en la técnica anterior, controlar de manera predictiva el signo y la carga del momento angular de la onda óptica resulta ser un problema; se han probado muchas soluciones sin buenos resultados en términos de repetibilidad y reproducibilidad.

El dispositivo de acuerdo con la invención comprende cualquier tipo de láser. En una realización preferida, el dispositivo de láser de acuerdo con la invención puede comprender cualquier tipo de láser de disco, tal como, por ejemplo, un láser de emisión superficial con cavidad externa vertical, pero también puede ser compatible con láseres de estado sólido de bomba de diodo (DPSSL - Diode Pump Solid State Lasers, en inglés), láseres de colorante, láseres de gas.

Por lo tanto, el dispositivo de láser de acuerdo con la invención proporciona un diseño simplificado, sin la necesidad de elementos adicionales o de una óptica adicional de conformación del haz, y es adecuado para operaciones de alta potencia con buena coherencia y buena estabilidad.

El dispositivo de acuerdo con la invención comprende cualquier tipo de cavidad óptica. En una realización preferida, dicha cavidad óptica puede estar compuesta, por lo menos, de una fibra óptica con un extremo cortado y que comprende, por lo menos en una parte de su longitud, una región de ganancia.

De acuerdo con otro modo de realización, el por lo menos un medio para conformar los perfiles de la intensidad de la luz y/o de la fase de la onda óptica pueden consistir, por lo menos, en un medio para filtrar transversalmente dicha onda óptica.

De acuerdo con otro modo de realización, el por lo menos un medio para el filtrado transversal de la onda óptica puede estar centrado en un eje central longitudinal.

De acuerdo con la invención, el por lo menos un medio para el filtrado transversal de la onda óptica comprende las siguientes zonas con funcionalidad:

- una zona central discoidal que proporciona elevadas pérdidas ópticas entre un valor mínimo de desplazamiento de fase y un valor máximo del desplazamiento de fase, y

- una zona anular, situada alrededor de la zona central discoidal y que proporciona un desplazamiento de fase gradual acimutal  $\Delta m$  por recorrido de ida y vuelta de la cavidad.

Por ejemplo, el desplazamiento de fase entre las dos zonas de la zona central discoidal puede ser del orden de  $\pi/4$ .

Las pérdidas inducidas por la zona central discoidal pueden ser proporcionadas por cualquier tipo de estructura, tal como, por ejemplo, una estructura de absorción, una estructura de difusión o una estructura de difracción. Dichas estructuras pueden proporcionar algunas pérdidas locales con el fin de atenuar el modo fundamental de emisión de láser.

El desplazamiento de fase  $\Delta m$  inducido por la zona anular puede ser de cualquier tipo que sea capaz de causar que se deshaga el desplazamiento acimutal en la onda óptica que está oscilando en el interior de la cavidad óptica en orden. En una realización preferida, la zona anular está realizada con un material que crea difracción tal como se describirá a continuación.

Por lo tanto, es posible introducir una cierta perturbación débil en la cavidad óptica y, de este modo, controlar el desplazamiento de fase del frente de onda de la emisión láser dentro de la cavidad óptica con el fin de proporcionar un momento angular orbital. La carga y el signo del momento angular orbital son controlados ajustando las características dimensionales y ópticas, por lo menos, de un medio para el filtrado transversal de la onda óptica. De manera más precisa, cada una de las zonas definidas anteriormente implementa una función distinta para la emisión de láser de vórtice:

- la zona central discoidal implementa un escalón de fase brusco para proporcionar elevadas pérdidas de difracción en el centro de la máscara, utilizado para seleccionar un "modo de rosquilla" de vórtice dado poniendo este escalón de fase en la región oscura de este modo. Por lo tanto, todos los modos de emisión de láser, excepto el deseado, tienen elevadas pérdidas de difracción. También permite controlar la carga del modo de vórtice controlando el diámetro de la zona central discoidal. Cuanto mayor es el diámetro, mayor es el núcleo oscuro de los "modos de rosquilla" del vórtice y, por lo tanto, mayor es la carga del OAM.

- La zona anular introduce una perturbación de fase para controlar la dirección de rotación del modo de vórtice, es decir el signo del OAM.

De acuerdo con la invención, el por lo menos un medio para el filtrado transversal de la onda óptica comprende además una zona exterior adicional con funcionalidad que genera ganancia (por medio de bombeo) y/o pérdidas (gracias a la absorción, la difusión y la difracción) y situada en la región periférica. En una realización preferida, la zona exterior adicional con funcionalidad está situada fuera de la zona anular. Esta zona exterior adicional con funcionalidad tiene como objetivo filtrar la onda óptica que está oscilando en el interior de la cavidad óptica para limitar su diámetro externo y seleccionar el modo deseado.

Por lo tanto, es posible seleccionar de manera más precisa los modos transversales giratorios simétricos que permiten el efecto de emisión de láser de vórtice, proporcionando suficiente atenuación a lo largo de los modos transversales de orden superior no deseados.

En algún otro modo de realización, la zona central discoidal puede estar dividida en dos subzonas, proporcionando la primera subzona el valor mínimo del desplazamiento de fase, y proporcionando la segunda subzona el valor máximo del desplazamiento de fase, proporcionando dicha zona central discoidal pérdidas modales. Preferencialmente, las dos subzonas son iguales, es decir, cada una cubre el 50% de la zona central discoidal con el fin de proporcionar pérdidas máximas en el modo fundamental de emisión de láser. No obstante, en algún otro modo de realización, una de las dos subzonas puede ser más pequeña que la otra.

En algún otro modo de realización, la zona anular puede proporcionar, por lo menos, un desplazamiento de fase  $\Delta m$  espiral perturbador graduado entre el valor mínimo del desplazamiento de fase y el valor máximo del desplazamiento de fase para un giro como máximo, y para una ida y vuelta de la onda óptica en la cavidad óptica, proporcionando dicha zona anular un desplazamiento de fase modal comprendido entre  $2\pi \times 1 \cdot 10^{-5}$  y  $2\pi/5$ . El valor del desplazamiento de fase puede ser obtenido, por lo menos, con un medio para el filtrado transversal.

En algún otro modo de realización, el valor máximo del desplazamiento de fase  $\Delta m$  puede ser insignificante con respecto a  $2\pi$  y, por ejemplo, puede ser menor que  $\Delta m = 2\pi/5$ , para no perturbar demasiado la onda óptica que está oscilando en el interior de la cavidad óptica. El propósito es introducir solo un pequeño efecto perturbador para romper la simetría del modo en sentido antihorario y para elevar la degeneración (división de frecuencia óptica) de los modos de vórtice con la misma carga, pero con dirección opuesta a la rotación.

En algún otro modo de realización, el valor mínimo del desplazamiento de fase puede ser igual a 0 y el valor máximo del desplazamiento de fase puede ser igual a  $2\pi/100$  radianes. De una manera más general, los valores de los desplazamientos de fase están dirigidos a perturbar los modos de eigen de la cavidad. Por lo tanto, es necesario introducir algunas perturbaciones de luz con alguna diferencia de fase débil. El valor máximo puede ser del orden de un pequeño porcentaje de  $2\pi$  radianes, dependiendo de la finura de la cavidad. Típicamente, el desplazamiento de fase resultante en la fase acimutal del haz modal puede estar comprendido entre  $2\pi \times 1 \cdot 10^{-5}$  y  $2\pi/5$  por recorrido de ida y vuelta.

Por lo tanto, el desplazamiento de fase modal resultante es proporcional a  $\Gamma_{xy} \times \Delta m$ , donde  $\Gamma_{xy}$  es el factor de superposición entre el haz y el Elemento de fase en espiral (SPE – Spiral Phase Element, en inglés) proporcionado por la zona anular, dado por:

$$\Gamma_{xy} = \iint_S |U_n(x, y)|^2 U_{SPE}(x, y) dS$$

5 Donde  $U_n(x, y)$  es la distribución transversal del campo del modo de la cavidad óptica y  $U_{SPE}$  es la función de distribución superficial del elemento de fase en espiral.

Dado que se desea que el desplazamiento de fase modal  $\Gamma_{xy} \times \Delta m$  sea significativamente menor de  $2\pi$ , con una definición más precisa, puede ser posible utilizar que la división de frecuencia óptica resultante de los dos modos VORTEX de sentido antihorario sea mayor que una fracción del corte de la frecuencia de la cavidad óptica, correspondiente al *Rango espectral libre / Finura*.  
10

En algunas otras realizaciones, la perturbación de fase acimutal proporcionada por el elemento de fase en espiral puede ser monótona, desde un mínimo y hasta un máximo.

En algunas otras realizaciones, la perturbación de fase acimutal proporcionada por el elemento de fase en espiral puede ser lineal entre un valor mínimo en una primera posición acimutal (por ejemplo, 0 radianes) y un valor máximo en una segunda posición acimutal (por ejemplo,  $2\pi$  radianes).  
15

En algunas otras realizaciones, el valor máximo de la desviación de fase acimutal proporcionada por el Elemento de Fase Espiral puede alcanzarse antes de un giro ( $2\pi$  radianes).

En algunas otras realizaciones, la perturbación de fase acimutal proporcionada por el elemento de fase en espiral puede ser no monótono y constituido por más que dos extremos en un giro ( $2\pi$  radianes).

20 En algunas otras realizaciones, la perturbación acimutal proporcionada por el elemento de fase en espiral puede estar constituida por algunas partes lineales con diferentes tipos de pendiente y/o signo, tal como, por ejemplo, una señal de diente de sierra.

De acuerdo con otro modo de realización, el por lo menos un medio para el filtrado transversal puede consistir en una sola máscara situada en o cerca de una de las siguientes ubicaciones: (i) un antinodo de la onda óptica, (ii) en la región de ganancia, (iii) en la segunda superficie especular.  
25

En otro modo de realización, el por lo menos un medio para el filtrado transversal puede consistir en una pluralidad de máscaras diseñadas, por lo menos, con una zona con funcionalidad y, por lo menos una, de la pluralidad de máscaras está situada en o cerca de un antinodo de la onda óptica.

En una realización preferida, el por lo menos un medio para el filtrado transversal puede consistir, por lo menos, en una máscara de grosor de sub-longitud de onda para reducir las pérdidas por difracción a lo largo del modo deseado y para ser selectivo con los modos no deseados.  
30

En una realización preferida, el por lo menos un medio para el filtrado transversal de la onda óptica puede ser un elemento fotónico plano. De este modo, se facilita la realización de dicha estructura y su integración, especialmente su centrado a lo largo del eje longitudinal, en el interior de la cavidad óptica.

35 En una realización preferida, el por lo menos un medio para el filtrado transversal de la onda óptica puede estar situado cerca de un antinodo de la onda óptica con el fin de introducir una diferencia de fase tan débil con buena precisión.

En otra realización preferida, los desplazamientos de fase de la zona central discoidal y/o la zona anular pueden ser proporcionados mediante variaciones del índice de refracción, por lo menos, de un medio para el filtrado transversal de la onda óptica.  
40

En otra realización preferida, los valores del desplazamiento de fase de dicha zona central discoidal y dicha zona anular pueden ser proporcionados mediante el control de las características dimensionales de la rejilla bidimensional, por lo menos, del un medio para filtrar transversalmente la onda óptica.

45 De este modo, la rejilla bidimensional del por lo menos un medio para el filtrado transversal actúa como un metamaterial con un índice de refracción igual a la constante de propagación normalizada del modo Bloch fundamental. Por lo tanto, su índice de refracción puede ser controlado adicionalmente mediante un control cuidadoso de las características dimensionales de la red bidimensional, tal como, por ejemplo, los diámetros de los huecos y la distancia entre dos huecos. De hecho, los pequeños huecos de aire corresponden a un dieléctrico

artificial denso con un gran índice efectivo, mientras que las zonas de gran hueco implementan dieléctricos artificiales de bajo índice de refracción.

5 Como un ejemplo no restrictivo, para la rejilla bidimensional de sub-longitud de onda realizada con cristales fotónicos, el período estructural de la rejilla puede estar comprendido entre 0 y el valor mínimo entre  $\lambda/n_{\text{grat}}$  y  $\lambda/n_{\text{sub}}$ , donde  $n_{\text{sub}}$  es el índice de refracción de la capa de sustrato sobre el cual se deposita el cristal fotónico, y  $n_{\text{grat}}$  es el de la rejilla bidimensional; y el diámetro del hueco debe estar comprendido entre 0 y el período estructural de la rejilla definido previamente.

10 En una realización preferida, el elemento fotónico plano de acuerdo con la invención puede ser fabricado utilizando tecnología de semiconductores III - V o gracias a un material semiconductor, un material dieléctrico, un material orgánico o un material metálico, siempre que la parte real del índice óptico varíe a lo largo del eje longitudinal de rotación. Por lo tanto, lo hace muy compacto y fácil de integrar en el interior de la cavidad del láser, garantizando los requisitos de simetría y contribuyendo a proporcionar un dispositivo de láser robusto.

15 De acuerdo con otro modo de realización de la presente invención, el medio para bombear la región de ganancia puede comprender (i) un láser de bombeo que emite un rayo láser de bombeo y (ii) un medio dispuesto para configurar espacialmente la intensidad del rayo láser de bombeo. De acuerdo con la invención, el por lo menos un medio para conformar los perfiles de la intensidad de la luz y/o de la fase de la onda óptica, por lo menos dos modos transversales de la onda óptica pueden comprender los medios para configurar espacialmente la intensidad del rayo láser de bombeo y pueden estar dispuestos para proyectar un patrón de intensidad del haz de bombeo sobre la región de salida correspondiente, por lo menos, con un modo transversal rotatorio - simétrico seleccionado de la onda óptica.

20 Por lo tanto, es posible bombear ópticamente los modos transversales simétricos rotatorios de la onda óptica que está oscilando en el interior de la cavidad óptica. Los otros modos no son bombeados. Por lo tanto, solo se magnifican y, por lo tanto, se seleccionan, los modos transversales rotatorios simétricos. Un aspecto de la invención es que la forma del rayo láser de bombeo es compatible con esos modos. En otros términos, la intensidad del haz de bombeo puede ser conformada como el perfil transversal de intensidad de la onda óptica que se busca en el interior de la cavidad óptica. Para alcanzar este objetivo, el láser de bombeo puede estar equipado con algún filtro espacial, por ejemplo, para conformar su intensidad.

25 En una realización preferida, el patrón de intensidad del haz de bombeo proyectado por el láser de bombeo sobre la región de salida puede tener forma de "rosquilla".

30 De acuerdo con otro modo de realización, el medio para bombear la región de ganancia puede consistir en un bombeo eléctrico de la región de ganancia.

De acuerdo con otro modo de realización, el segundo espejo puede ser un espejo cóncavo, un espejo cónico o un espejo esférico.

35 De acuerdo con otro modo de realización, el dispositivo de láser puede comprender además por lo menos una lente intracavitaria cilíndrica o esférica y el segundo espejo puede ser un espejo de extremo plano.

De acuerdo con otro modo de realización, el dispositivo de la presente invención puede comprender además por lo menos un medio para controlar activamente la longitud óptica longitudinal de la cavidad y/o la diferencia de trayectoria óptica acimutal de la cavidad con el fin de controlar activamente la carga y/o el signo del momento angular orbital.

40 En una realización preferida, el por lo menos un medio para controlar activamente la longitud óptica longitudinal y/o la diferencia de trayectoria óptica acimutal de la cavidad puede ser mecánica y/o térmica y/o eléctrica.

En una realización preferida, el por lo menos un medio para controlar activamente la longitud óptica longitudinal de la cavidad puede ser un accionador diseñado para mover el segundo espejo con el fin de cambiar la longitud de la cavidad óptica.

45 De acuerdo con otro modo de realización, el dispositivo de la presente invención puede comprender además por lo menos un filtro espectral de ancho de banda amplio con el fin de seleccionar otro modo longitudinal para proporcionar un modo de vórtice único con multifrecuencias.

50 Otro aspecto de la invención es proponer un método para generar una onda óptica de fase de forma helicoidal que comprende, por lo menos una, de las siguientes etapas: (i) generar una onda óptica dentro de una región de ganancia, oscilando dicha onda óptica en el interior de una cavidad óptica, (ii) bombear la onda óptica con un medio de bombeo, (iii) conformar los perfiles de la intensidad de la luz y/o de la fase de la onda óptica para seleccionar por lo menos un modo transversal rotatorio - simétrico de la onda óptica entre aquellos con un índice radial igual a cero y con un índice acimutal que es un número entero con un módulo mayor o igual que 1.

**Descripción de los dibujos**

Los métodos y los dispositivos de acuerdo con las realizaciones de la presente invención pueden entenderse mejor con referencia a los dibujos, que se dan solo con fines ilustrativos y no pretenden ser limitativos. Otros aspectos, objetivos y ventajas de la invención serán evidentes a partir de la descripción dada a continuación.

- 5 - La figura 1 describe la intensidad transversal y los perfiles de fase de los modos LG<sub>01</sub> y LG<sub>02</sub> de un láser de acuerdo con la invención.
- La figura 2 describe una vista esquemática de un dispositivo de láser que emite un rayo láser de vórtice de acuerdo con la invención.
- 10 - La figura 3 es una representación esquemática de la máscara de conformación de la intensidad / fase de acuerdo con la invención.
- La figura 4 es una vista esquemática del gradiente de fase proporcionado a lo largo de la zona anular de la máscara de acuerdo con la invención.
- La figura 5 es una imagen de microscopio óptico del elemento de fotónica plana de acuerdo con la invención.
- 15 - La figura 6 describe algunos perfiles de intensidad medidos de los modos LG que tienen frente de onda helicoidal, y franjas de interferencia en espiral correspondientes.
- La figura 7 describe una vista esquemática de un dispositivo de láser de acuerdo con la invención, implementando una pluralidad de medios para filtrar transversalmente la onda óptica.
- La figura 8 describe dos ejemplos de medios para filtrar la onda óptica con el fin de seleccionar dos modos transversales rotativos simétricos.
- 20 - La figura 9 es un perfil de intensidad de un rayo láser de bombeo utilizado para seleccionar por lo menos un modo transversal rotatorio - simétrico de la onda óptica en otro modo de realización de la presente invención.
- La figura 10 es un gráfico que ilustra la evolución de la frecuencia de golpeo (resultante de la elevación de la degeneración) con respecto al factor de solapamiento.
- La figura 11 es un gráfico que ilustra la evolución del factor de superposición con respecto a la relación  $\Phi/w_0$ .
- 25 - La figura 12 describe dos ejemplos diferentes de realización de láser de multifrecuencia de un solo vórtice ilustrando su espectro óptico normalizado.

Aunque esta invención se ha descrito junto con varias realizaciones, es evidente que muchas alternativas, modificaciones y variaciones serían o son evidentes para los expertos en las técnicas aplicables.

**Descripción detallada de la invención**

- 30 En adelante, los adjetivos "longitudinal" y "acimutal" se refieren a la dirección que se corresponde con la de la propagación de la onda óptica o el eje de la cavidad, mientras que los adjetivos "transversal" y "radial" se refieren a una dirección ortogonal a la longitudinal.

El adjetivo "acimutal" se refiere a un ángulo medido sobre un plano transversal y obtenido por una rotación dada a lo largo del eje longitudinal.

- 35 En las siguientes descripciones, el primer elemento 200 se considera que es un elemento semiconductor, sin limitar la presente invención.

Tal como se describió anteriormente, la presente invención está dirigida a seleccionar los modos transversales rotativos simétricos de la onda óptica que está oscilando en el interior de la cavidad óptica. Uno de esos modos es el Laguerre - Gauss con un índice radial igual a 0 y un índice acimutal que es un entero no nulo. Puede ser tanto

- 40 positivo como negativo. En otra realización, también puede ser un valor no entero, correspondiente con una selección no perfecta del modo de eigen.

- 45 La figura 1 ilustra tanto la intensidad transversal como los perfiles de fase de los modos LG<sub>01</sub> y LG<sub>02</sub> de un láser de acuerdo con la invención. Los diagramas 101 y 103 ilustran respectivamente la intensidad y los perfiles de fase del modo LG<sub>01</sub>, mientras que los diagramas 102 y 103 ilustran respectivamente la intensidad y los perfiles de fase del modo LG<sub>02</sub>. Esos diagramas están trazados a lo largo del plano transversal.

Los perfiles de intensidad ilustrados en 101 y 102 muestran una "forma de rosquilla": el centro está oscuro, ya que no hay emisión de luz, y está rodeado por un anillo de luz, cuyo perfil de intensidad es de tipo gaussiano. Además, cuanto mayor sea la carga topológica M, mayor será el diámetro interno del núcleo oscuro.

Más adelante se describirá que el diámetro de la zona discoide central interna está definido de acuerdo con la carga topológica  $M$  buscada para el modo helicoidal deseado.

5 El diagrama 105 ilustra una representación esquemática del frente de onda helicoidal de un haz de vórtice con una carga topológica  $M = 1$  y, de manera más precisa, la propagación de un plano de fase constante a lo largo del eje longitudinal  $z$ .

Tal como se describió anteriormente, la presente invención se puede llevar a cabo, por lo menos, con dos modos de realización descritos a continuación:

- el primer modo de realización implementa por lo menos un medio para filtrar la onda óptica, y
- el segundo modo de realización implementa un bombeo óptico no homogéneo para magnificar selectivamente los modos transversales rotatorios simétricos deseados.

Primer modo de realización

Con referencia a la figura 2, se describe un primer modo de realización de la presente invención. Este modo permite módulos de láser estables y compactos, con modo helicoidal de frecuencia única robusto y estabilizado.

15 En una realización preferida, la presente invención se basa en un VeCSEL bien conocido e integra funcionalidades que utilizan tecnologías III - V y cavidad óptica externa de tipo cóncavo. No obstante, la presente invención está dirigida a proteger todo tipo de fuentes de láser que sean adecuadas para las aplicaciones mencionadas anteriormente y para las realizaciones siguientes.

20 La tecnología VeCSEL comprende básicamente un elemento semiconductor 200 con un medio de ganancia 203 para generar la radiación óptica y un primer espejo 210. El medio de ganancia 203 puede comprender, por ejemplo, pozos cuánticos o puntos cuánticos y puede bombearse eléctrica u ópticamente. El primer espejo 210 puede comprender una sucesión de capas que constituyen una rejilla de Bragg 202 que refleja las ondas ópticas. En una realización preferida, el elemento semiconductor 200 puede estar montado en un disipador de calor con módulos Pelletier (no representados) para estabilizar y controlar la temperatura.

25 El espejo 202 de Bragg tiene una alta reflectividad, mayor de 99% o mayor que el espejo de salida; por ejemplo, puede estar constituido por 31,5 pares de capas de cuarto de onda AIAs / GaAs.

La región de ganancia 203 está realizada, por ejemplo, con doce pozos Quantum InGaAs / GaAs (P) equilibrados en tensión situados en el antinodo del campo láser en la cavidad, con una distribución longitudinal no homogénea que garantiza la misma excitación del portador del pozo cuántico. El grosor óptico total de la región activa de Bragg al aire es de  $13/2$  capas de media onda.

30 Este elemento semiconductor 200 se fabrica gracias a las conocidas tecnologías de fabricación de semiconductores, tales como epitaxia de haces moleculares de semiconductores, deposición de fase vapor química orgánica de metal, litografía electrónica, grabado en seco y grabado en húmedo. Se puede utilizar cualquier material semiconductor para fabricar dicho dispositivo de acuerdo con la invención.

35 Se proporciona y se dispone un segundo espejo 206 externo con forma cóncava para formar una cavidad óptica externa con el primer espejo 210 y estabilizar algunos modos transversales.

40 La cavidad óptica externa se denomina "externa" porque comprende una parte que es distinta del elemento semiconductor. No necesita ningún componente adicional para el correcto funcionamiento del láser. Preferencialmente, su parte externa está llena de aire, constituyendo el entrehierro 207, pero en algunas otras realizaciones, la cavidad óptica del dispositivo de láser de acuerdo con la invención puede incluir un espaciador sólido entre la región de salida y el segundo espejo para formar una cavidad monolítica. Como ejemplo, dicha cavidad monolítica podría ser realizada con un monolito de zafiro o con vidrio.

En una realización preferida, la cavidad externa está centrada en un eje de rotación longitudinal central.

45 El segundo espejo 206 puede ser un espejo a base de vidrio dieléctrico o puede tener algunos cristales fotónicos en una superficie de semiconductor o grabada. Tiene un pequeño porcentaje de transmisión para permitir que el rayo láser salga del láser. Típicamente, el segundo espejo externo está situado a unos pocos milímetros (típicamente 1 mm) del elemento semiconductor, y tiene un radio de curvatura de pocos milímetros (típicamente alrededor de 10 mm). En el ejemplo ilustrado en la figura 2, un espacio 207 de aire separa el espejo 206 externo cóncavo del elemento semiconductor 200.

50 A continuación, se utiliza un bombeo óptico (no representado) para elevar los electrones de los niveles de baja energía a algunos excitados superiores gracias a un diodo láser (o cualquier fuente coherente o incoherente) o gracias a la inyección eléctrica. En una realización preferida, el bombeo óptico puede ser reemplazado por un único diodo láser de modo transversal. Como ejemplo, la longitud de onda puede ser de 785 nm y la potencia de salida de

300 mW. El rayo láser de bombeo es enfocado sobre la superficie externa de medio VECSEL para proporcionar un tamaño de punto de  $50 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$ .

5 Para seleccionar un modo transversal rotatorio - simétrico que presente un OAM, tal como por ejemplo un modo transversal de Laguerre - Gauss (LG) entre uno de los  $\text{LG}_{0M}$  conjuntos de modos (módulo de OAM  $|M| \geq 1$ ), por lo menos un medio 204 para el filtrado transversal de la onda óptica es introducido en la cavidad óptica. En la figura 2, está situado en la región de salida de ganancia (es decir, en la parte superior del espejo de ganancia) del elemento semiconductor 200, pero de una manera más general, puede estar situado preferencialmente o cerrado a un antinodo de la onda estacionaria óptica.

10 Los medios para filtrar transversalmente la onda óptica 204 incluyen muchos tipos de medios para filtrar espacialmente la onda estacionaria óptica en el interior de la cavidad óptica, tales como, por ejemplo, (i) medios para difractar la luz (tales como huecos, por ejemplo), (ii) medios para difundir la luz (tales como, la superficie semiconductor grabada, por ejemplo), (iii) medios para absorber la luz (tales como una máscara metálica, por ejemplo), y (iiii) medios para generar una distribución de ganancia local no uniforme.

15 Los medios para el filtrado transversal de la onda óptica muestran tres superficies con funcionalidad descritas en la figura 3 y que pueden estar integrados en un solo elemento o distribuidos en una pluralidad de elementos.

Como ejemplo, la zona central discoidal puede estar depositada sobre un primer elemento y estar situada en una primera posición, mientras que la zona anular puede estar fabricada sobre un segundo elemento y estar depositada en una segunda posición del dispositivo de láser.

20 Tal como se ilustra en la figura 7, tanto la zona central discoidal 702 y la zona de absorción 701 pueden estar depositadas sobre el primer elemento 200 mediante máscaras dobles, mientras que la zona anular 703 puede estar situada sobre el segundo espejo 206.

25 Cuando el dispositivo de acuerdo con la invención está dividido con más de un elemento, se debe tener cuidado con los efectos de creación de difracción de la onda óptica láser en el interior de la cavidad óptica: la dimensión lateral y acimutal de dichos elementos debe estar adaptada para o tener en cuenta la difracción producida por el primer elemento sobre la luz, antes de llegar al segundo elemento.

En el modo de realización ilustrado en la figura 2, los medios para el filtrado transversal de la onda óptica son del tipo de un elemento fotónico plano único que incluye las tres zonas con funcionalidad.

30 La figura 3 ilustra una representación esquemática del elemento de filtrado transversal 300 de intensidad / fase de acuerdo con la invención. Consiste en un cristal fotónico con una red de sub-longitud de onda bidimensional 310 formada por una única capa de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  perforada por un conjunto bidimensional de huecos con un diámetro (h) y dispuestos en una cuadrícula, con un paso (a).

35 La rejilla bidimensional 310 actúa como un metamaterial con un índice de refracción igual a la constante de propagación normalizada del modo Bloch fundamental. Por lo tanto, el índice de refracción de este metamaterial puede ser controlado mediante un control cuidadoso de los diámetros (h) de los huecos, donde los huecos de aire pequeños corresponden a un dieléctrico artificial denso con un índice eficaz elevado cercano al del material  $\text{Si}_3\text{N}_4$  a granel, mientras que las zonas de huecos grandes implementan dieléctricos artificiales de bajo índice de refracción.

Se diseñaron tres zonas diferentes que proporcionan tres funciones independientes:

- una zona central discoidal 303, que proporciona elevadas pérdidas de difracción entre un valor mínimo del desplazamiento de fase y un valor máximo del desplazamiento de fase,
- 40 - una zona anular 302, situada alrededor del centro de la zona discoidal 303 y que proporciona una fase gradual en la transmisión con bajas pérdidas de difracción, y
- una zona de ganancia 301, situada en la región periférica, exterior de la zona anular.

45 La primera función proporciona elevadas pérdidas de difracción y está alineada con el eje longitudinal de la cavidad óptica del láser, implementada mediante la utilización de un escalón de fase 304 brusco. Este efecto topológico particular permite seleccionar un modo de rosquilla poniendo este escalón de fase en la región oscura de este modo.

50 De esta manera, todos los modos, excluyendo el deseado, experimentan pérdidas de difracción elevadas. También permite controlar la carga del modo de vórtice, cambiando la longitud de la cavidad y, por lo tanto, el tamaño del modo o el diámetro del área pérdidas elevadas a los otros modos de vórtice con núcleo oscuro mayor y, por lo tanto, una carga de OAM más elevada. Se consigue con una rejilla de dos estados: una primera subzona homogénea 402 con algunas características dimensionales que conducen a un valor mínimo de fase, y una segunda subzona homogénea 401 con algunas otras características dimensionales que conducen a un valor máximo de fase.

Las características dimensionales del elemento fotónico plano de rejilla bidimensional se describirán con la figura 5. A continuación, el término factor de llenado se utiliza con las características dimensionales de la rejilla bidimensional para obtener el desfase deseado.

5 La segunda función es una función de fase en espiral perturbadora con un perfil de fase gradual 302 diseñado para introducir una diferencia de fase débil  $\Delta m \cong 2\pi/100$  para un giro completo alrededor del eje longitudinal y para controlar el signo del momento angular orbital (OAM), es decir, la dirección de la rotación del frente de onda helicoidal 305. Se implementa mediante la variación suave acimutal del factor de llenado (dado por  $h/a$ ). Para introducir una diferencia de fase tan débil con buena precisión, la capa de rejilla bidimensional 310 se coloca cerca de un nodo de ondas estacionarias de campo eléctrico en la estructura.

10 La tercera función es un filtrado adicional 503, 701 (visible en la figura 5 y la figura 7) para evitar que los otros modos atraviesen la cavidad óptica. Su objetivo es disminuir la magnitud de esos modos, por ejemplo, atenuando su intensidad gracias a la absorción, la difracción, la difusión o el bombeo local.

En la figura 3 y la figura 4, la escala de grises ilustra el valor del desfase obtenido con el dispositivo de acuerdo con la invención.

15 La figura 4 ilustra en primer lugar la zona central bifásica 303 y, en segundo lugar, el gradiente de fase proporcionado a lo largo de la zona anular 302 (denominado en lo sucesivo el elemento de fase en espiral - SPE) del elemento fotónico plano de acuerdo con una realización de la invención. El desfase se extiende entre un valor mínimo 411 y un valor máximo 412, y un objetivo de la invención es que el valor máximo 412 no sea demasiado grande para no perturbar demasiado la onda óptica que está conectada a la cavidad óptica. De manera más precisa, el valor máximo de desfase debe estar limitado a un pequeño porcentaje de  $2\pi$  radianes.

20 En el modo de realización representado en la figura 4, el desfase proporcionado por el elemento de fase en espiral 302 va de 0 a  $2\pi/100$ .

El gradiente de fase anular está dirigido a controlar el signo del OAM perturbando débilmente la base de eigen de la cavidad y haciendo que el resonador de láser sea más favorable para mantener un signo de rotación del frente de onda helicoidal.

25 De hecho, los haces de vórtice con OAM superior tienen una mayor dispersión de energía espacial con núcleos oscuros más grandes. Por lo tanto, el haz de vórtice que tiene un frente de onda helicoidal con direcciones de rotación opuestas a las del elemento de fase en espiral (SPE), experimenta una ligera reducción de su OAM en cada ida y vuelta. Tal como se definió anteriormente, esta reducción es proporcional a  $\Gamma_{xy} \times \Delta m$ , donde  $\Gamma_{xy}$  es el factor de superposición entre el haz y el elemento de fase en espiral.

30 Este es un problema fundamental para el elemento fotónico plano de acuerdo con la invención, porque la reducción de la dispersión de energía del haz aumenta la superposición con la SPE en cada recorrido de ida y vuelta en el interior de la cavidad óptica, lo que aumenta el efecto de la SPE en el haz. A continuación, el haz es atrapado en un efecto recursivo y es fuertemente perturbado, porque a medida que su energía se extiende y su región oscura se estrecha, el modo se ve más afectado por el escalón de fase en la zona central discoidal.

35 Por otro lado, el haz de vórtice que tiene un frente de onda helicoidal con una dirección de rotación similar a la del elemento de fase en espiral experimenta un ligero aumento de su OAM cada ida y vuelta en el interior de la cavidad óptica, aumentando su dispersión espacial y reduciendo la superposición con el elemento de fase. Esto explica por qué es posible observar una ruptura de simetría del modo de sentido antihorario, inicialmente degenerado.

40 La figura 5 ilustra algunas imágenes de microscopio óptico de un elemento fotónico plano fabricado de acuerdo con la invención. Tal como se describió anteriormente, consiste en una rejilla bidimensional de sub-longitud de onda basada en una capa de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  de grosor  $\lambda/8$  depositada sobre el espejo de ganancia por evaporación al vacío con haz de electrones asistida por haz de iones.

45 A continuación, una resina de metacrilato de polimetilo (PMMA – PolyMethyl MethAcrylate, en inglés) es recubierta por centrifugación (spin coated, en inglés) sobre la oblea y diseñada mediante litografía con haz de electrones. Después del desarrollo del PMMA, los huecos de rejilla bidimensional son transferidos a la capa de SiN mediante grabado iónico reactivo y, a continuación, el PMMA es retirado.

50 La figura 5 representa en 500 la zona central discoidal 303 y la zona anular 302 que integra la rejilla bidimensional de sub-longitud de onda 310 con las dos funciones de fase visibles. Dos recuadros 501 y 502 ilustran la rejilla bidimensional para diferentes ubicaciones alrededor del elemento de fase en espiral: el primer recuadro 501 resalta un factor de llenado bajo que se corresponde con un índice de refracción efectivo bajo, mientras que el segundo recuadro 502 resalta un factor de llenado elevado que se corresponde con un alto índice de refracción efectivo. El factor de llenado de la rejilla bidimensional sigue un gradiente suave entre esas dos posiciones, con el fin de proporcionar un gradiente de desfase suave, tal como se ilustra en la figura 4. Para calcular el perfil del factor de llenado que proporciona el índice de refracción efectivo deseado, se utiliza el bien análisis riguroso de onda acoplada (RCWA – Rigorous Coupled-Wave Analysis, en inglés).

55

Se pueden realizar muchas dimensiones para la rejilla y los huecos, para poder elegir de acuerdo con el perfil de intensidad de los modos  $LG_{0M}$  dirigidos en la cavidad óptica. Típicamente, pero sin limitarse a, los elementos de la fase en espiral 302 pueden tener un diámetro interno 506 que varía de 6 micras a 10 micras y un radio externo 507 de 20 micras, independientemente de la dirección de la rotación.

- 5 Las características dimensionales de la rejilla bidimensional pueden estar definidas por la óptica del haz gaussiano y pueden ser calculadas a través del parámetro de haz gaussiano que está relacionado con el ancho y el radio de curvatura del frente de onda.

El parámetro del haz Gaussiano debe repetirse después de un recorrido de ida y vuelta.

- 10 Una vez que el parámetro del haz gaussiano ha sido calculado para una longitud de cavidad dada y se ha determinado el radio de curvatura de salida del espejo 206, la distribución de campo de la base completa del conjunto de los modos de LG se puede escribir y se puede elegir el tamaño de rejilla adecuado para seleccionar el modo deseado. Por ejemplo, la figura 5 ilustra esquemáticamente el perfil de campo eléctrico 505 del modo  $LG_{01}$  para una longitud de cavidad óptica de 9,5 mm, con un elemento de fase en espiral 302 de rejilla bidimensional sobrepreso de 6 micras de diámetro interno. Las líneas discontinuas 503 y 504 ilustran respectivamente el diámetro interior y exterior del perfil de intensidad en forma de rosquilla para el modo helicoidal obtenido con dicha estructura. Muestra la dependencia del espacio y la interacción de ambas zonas de desfase y el campo eléctrico de la onda óptica helicoidal.

- 15 La figura 6 es una imagen medida utilizando una cámara CCD bidimensional que ilustra los perfiles de intensidad de los modos Laguerre - Gauss que tienen frente de onda helicoidal y que se obtienen con un dispositivo de láser de acuerdo con la invención.

De manera más precisa, la figura 6 representa en 601 a 603 los perfiles de intensidad de campo lejano obtenidos con modos de vórtice de diferentes órdenes, respectivamente  $LG_{01}$ ,  $LG_{02}$  y  $LG_{03}$  en 601, 602 y 603, utilizando elementos de fase en espiral a izquierdas o a derechas tal como se muestran en 608 y 609.

- 20 La dirección de rotación del vórtice que controla la capacidad del dispositivo de láser de acuerdo con la invención se demuestra en las imágenes 604 a 607, en la que se han medido los patrones de interferencia, interactuando cada uno de los haces generados con un haz de referencia de frente de onda esférico. Las imágenes 604 y 605 ilustran las franjas en espiral de un inicio correspondientes a la helicidad  $LG_{01}$  a izquierdas y a derechas respectivamente, con una carga del OAM igual a 1. Las imágenes 606 y 607 ilustran las franjas en espiral de dos inicios correspondientes a la helicidad  $LG_{02}$  a izquierdas y a derechas, respectivamente, con una carga del OAM igual a 2.

- 25 La figura 6 ilustra algunas franjas en espiral de destreza bien determinadas, lo que demuestra que los modos helicoidales generados llevan un solo OAM con carga y signo controlados. De hecho, la destreza de la franja en espiral corresponde al signo del OAM, y el número de los inicios de las franjas del centro oscuro se corresponde con la carga del OAM. Las franjas en espiral demuestran que los haces helicoidales generan un momento angular orbital único bien definido, lo que es bien conocido que es un indicador de su pureza.

- 30 Como ejemplo no restrictivo, se describirá ahora a continuación un ejemplo completo de realización, considerando un láser de vórtice con los siguientes parámetros de cavidad óptica:

- Longitud de la cavidad:  $L_c = 9650 \mu\text{m}$
- Radio de curvatura del espejo cóncavo:  $R_c = 10 \text{ mm}$
- Pérdidas de la cavidad óptica (transmisión del espejo acoplador de salida):  $T = 0,5\%$

- 35 - Ancho del modo fundamental:  $w_0 = 24 \mu\text{m}$

Para controlar la carga del momento angular orbital para que sea igual a 1, el modo fundamental y otros modos de orden superior son filtrados utilizando:

- El diámetro de la zona anular (es decir, el SPE) es  $\Phi = 6,6 \mu\text{m}$ , situado al 3% del máximo de la intensidad del modo deseado.

- 40 - Una zona de bombeo limitada, con un diámetro  $W_{\text{max}} = 42 \mu\text{m}$ , correspondiente al ancho del modo deseado correspondiente a una intensidad de modo del 13%.

A continuación, para controlar de manera eficiente el signo del momento angular orbital de una manera más robusta, la división de frecuencia  $\Delta\nu = C \times \Gamma(r, \theta) \times l^2 \times \Delta m$  debe ser mayor que una fracción de la frecuencia de corte de la cavidad óptica  $f_c = \text{FSR} \times T/2\pi$ , donde:

- 45 -  $\Delta m$  es la diferencia total de fase en el elemento de fase en espiral ( $2\pi/50$ , por ejemplo) por recorrido de ida y vuelta,

-  $l$  es la carga del OAM,

5 -  $C = 2,4$  GHz/rad es una constante tecnológica definida por la tecnología e impulsada ajustando las curvas experimentales y teóricas, tal como se define en la figura 10, en la cual se describe la evolución de la frecuencia de incidencia con respecto al factor de superposición, tanto con algunos resultados experimentales como con algunos resultados de modelizado.

-  $\Gamma(r, \theta) = f(\Phi/w_0)$  es el factor de superposición previamente definido y depende de  $\Phi/w_0$ , tal como se ilustra en la figura 11, en la cual se ilustra la evolución del factor de superposición con respecto a la proporción  $\Phi/w_0$ .

-  $w_0$  es el ancho del modo fundamental de la base de LG.

10 FSR es el rango espectral libre de la cavidad óptica. A continuación, tal como ya se ha expuesto, el elemento de fase en espiral debe inducir un desplazamiento de fase modal resultante comprendido entre  $2\pi \cdot 10^5$  y  $2\pi/5$ .

En este ejemplo de realización, se han elegido los siguientes valores para lograr un láser de vórtice de acuerdo con la invención:

-  $\Delta m = 2\pi/50$ ,

-  $\Phi = 50 \mu\text{m}$ ,

15 Y proporciona un desplazamiento de fase modal de  $6 \cdot 10^{-3}$  rad y una división de frecuencia óptica resultante de  $\Delta\nu = 14,4$  MHz para el modo  $LG_{0,1}$  que está oscilando en el interior de la cavidad, mientras que la frecuencia de corte de la cavidad es  $f_c = 12$  MHz.

Segundo modo de realización

20 Tal como se describió anteriormente, la presente invención incluye asimismo medios para conformar el perfil de la intensidad de la luz y/o de la fase para seleccionar más de un modo transversal rotatorio - simétrico de la onda óptica que está oscilando en el interior de la cavidad óptica. La figura 8 describe dos ejemplos 810 y 820 de esta realización particular, en la que los medios para filtrar la onda óptica están diseñados para seleccionar dos modos transversales rotatorios simétricos.

25 En el primer ejemplo 810, el medio para filtrar la onda óptica consiste en una máscara metálica con cinco zonas con funcionalidad:

- una zona central 8115 sin pérdidas para transmitir el modo fundamental,

- una primera zona anular de absorción 8114,

- una zona anular de desplazamiento de fase 8113,

- una zona anular de transmisión 8112 que no induce pérdidas sobre la onda óptica, y

30 - una zona periférica de absorción 8111.

Tal como se ve en la imagen de intensidad 812 y la imagen de fase 813, esta máscara puede seleccionar dos modos:  $LG_{0,0}$  y  $LG_{0,15}$

En el segundo ejemplo 820, el medio para filtrar la onda óptica consiste en una máscara metálica con siete zonas con funcionalidad:

35 - una zona de absorción central 8217,

- una primera zona anular de desplazamiento de fase 8216,

- una primera zona anular de transmisión 8215, que no induce pérdidas en la onda óptica,

esas tres primeras zonas permiten seleccionar un primer modo transversal rotatorio - simétrico: el  $LG_{0,-1}$ ;

- una zona anular de absorción 8214,

40 - una segunda zona anular de desplazamiento de fase 8213,

- una segunda zona anular de transmisión 8212, que no induce pérdidas sobre la onda óptica,

esas tres segundas zonas permiten seleccionar otro modo transversal rotatorio - simétrico: el  $LG_{0,19}$ ;

- una zona periférica de absorción 8211.

Tal como se ve en la imagen de intensidad 822 y en la imagen de fase 823, esta máscara puede seleccionar dos modos transversales rotatorios simétricos:  $LG_{0,-1}$  y  $LG_{0,19}$ .

Tercer modo de realización

5 Otro objetivo de la presente invención es proporcionar un láser de vórtice simple con multifrecuencias utilizando por lo menos un filtro espectral de ancho de banda óptico ancho. Típicamente, el ancho de línea del láser puede alcanzar entre el cincuentavo y el quinto del ancho de banda de la ganancia en cualquier longitud y nitidez de la cavidad. Por lo tanto, para proporcionar un modo de vórtice simple de frecuencia doble o, alternativamente, de multifrecuencia con una diferencia de frecuencia dada, el ancho de banda de la ganancia y/o el ancho de banda del filtro pueden ser elegidos de tal manera que la diferencia de frecuencia esté comprendida entre el cincuentavo y el  
10 quinto del ancho de banda de la ganancia (respectivamente el ancho de banda del filtro).

De este modo, tal como se describe en la figura 12, es posible con un láser de vórtice según este tercer modo de realización, proporcionar un láser de vórtice simple de frecuencia doble de 10 GHz a 2 THz de diferencia de frecuencia y un solo láser de vórtice de frecuencia simple con un ancho de banda de ganancia inferior a 1THz.

15 De manera más precisa, la figura 12 ilustra el espectro láser obtenido con este tercer modo de realización de la invención: 1201 describe un láser de vórtice trifásico con un ancho de banda de ganancia de 6 THz que proporciona una diferencia de frecuencia de 300 GHz; 1202 representa un láser de vórtice de frecuencia doble con un ancho de banda de ganancia de 6 THz que proporciona una diferencia de frecuencia de 240 GHz; y 1203 representa el espectro de láser de un láser de vórtice de frecuencia única con relación de supresión de modos laterales alta: el ancho de banda de la ganancia es inferior a 2 THz, proporcionando una diferencia de frecuencia significativamente  
20 inferior a su rango espectral libre.

Cuarto modo de realización

En otro modo de realización de la presente invención, el por lo menos un modo transversal rotatorio - simétrico puede ser seleccionado a través de un rayo láser de bombeo que está modelizado a través de un diseño original. La utilización de este patrón de bombeo particular y no homogéneo produce algunos efectos equivalentes en la onda  
25 óptica del láser que está oscilando en el interior de la cavidad óptica.

La figura 9 ilustra un perfil de intensidad de un rayo láser de bombeo utilizado para seleccionar por lo menos un modo transversal rotatorio - simétrico de la onda óptica: está conformado para adaptarse al perfil de intensidad del modo transversal buscado: el perfil de intensidad del rayo láser de bombeo ilustrado en la figura 9 es como una "rosquilla", como el perfil de intensidad de la  $LG_{0,1}$  ya ilustrado en la figura 1.

30 En este modo particular de realización, el objetivo es operar una "ampliación especializada" de la onda óptica que está oscilando en el interior de la cavidad óptica. A diferencia del primer modo de realización en el que se utiliza, por lo menos, un medio para filtrar la onda óptica para inducir algunas pérdidas específicas, y en el que el bombeo es casi homogéneo en la zona central (pero está "cortando" la zona periférica), un modo particular de realización implementa un enfoque opuesto: no se producen pérdidas en la onda óptica, sino que se consigue un bombeo específico y no homogéneo para producir el mismo efecto.  
35

Por lo tanto, el rayo láser de bombeo puede ser formado por cualquier medio para producir un bombeo no homogéneo: solo las zonas correspondientes con un modo transversal rotatorio - simétrico son iluminadas - y ampliadas - por el rayo láser de bombeo.

Quinto modo de realización

40 En otro modo de realización de la presente invención, la carga del momento angular orbital y/o el signo, por lo menos, de un modo transversal rotatorio - simétrico pueden ser seleccionados por medio de un dispositivo de control activo.

Para conseguir dicha función, es necesario controlar activamente la longitud del trayecto óptico longitudinal de la cavidad óptica para modular la carga del OAM, y/o controlar activamente la longitud de la trayectoria de la diferencia acimutal de la cavidad óptica para modular el signo del OAM.  
45

Como ejemplo no restrictivo, un láser de vórtice correspondiente a cualquiera de los modos de realización previamente detallados puede ser obtenido, por lo menos, con un medio para el filtrado transversal de la onda óptica (y, más específicamente, su zona central discoidal y anular) cuyo índice de refracción es modulable, o cuya longitud de trayectoria óptica es modulable.

50 Por ejemplo, podría lograrse utilizando una intracavitaria de LCD o cualquier medio eléctrico, mecánico y/o térmico para sintonizar activamente la longitud de la trayectoria óptica de la cavidad y/o su índice de refracción, por ejemplo, utilizando moduladores electroópticos y/o fuentes de calor locales ...)

De manera más precisa, y cada efecto es independiente del otro, la modulación de longitud óptica longitudinal se puede lograr con algunos actuadores mecánicos para cambiar la longitud de la cavidad, o también con algunas

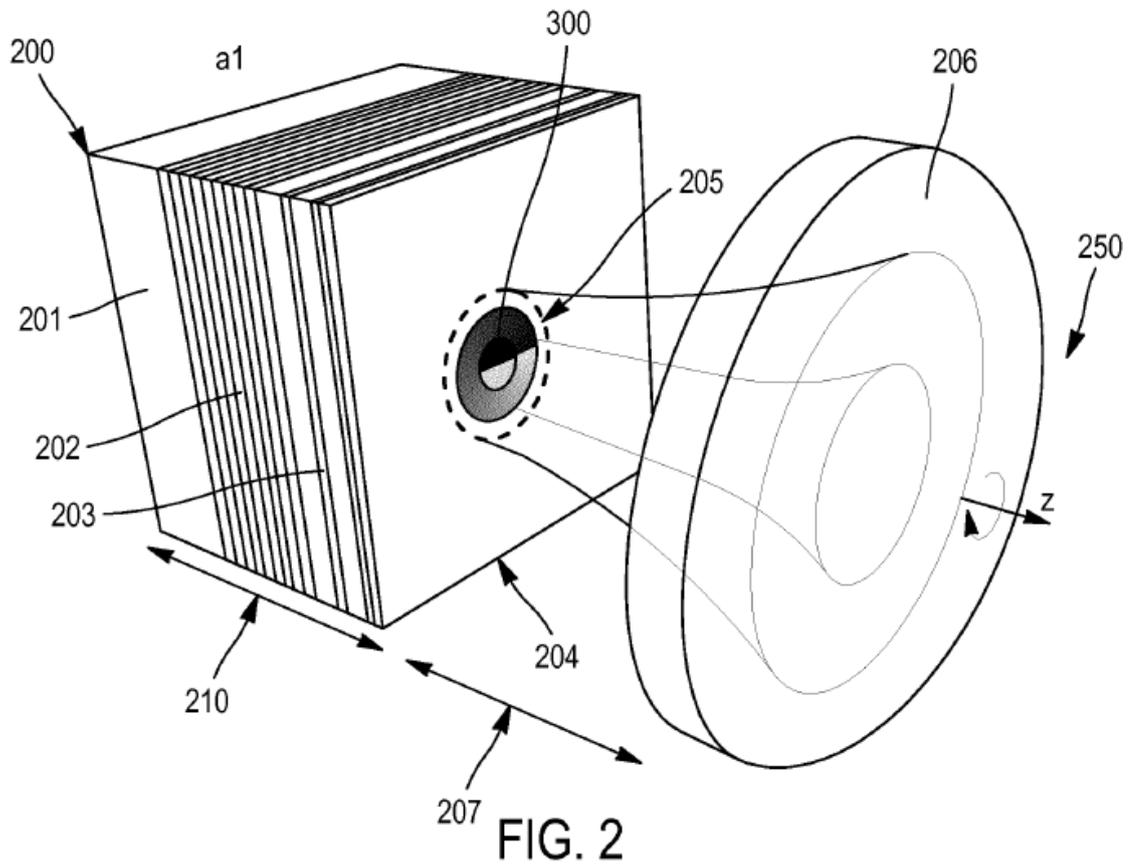
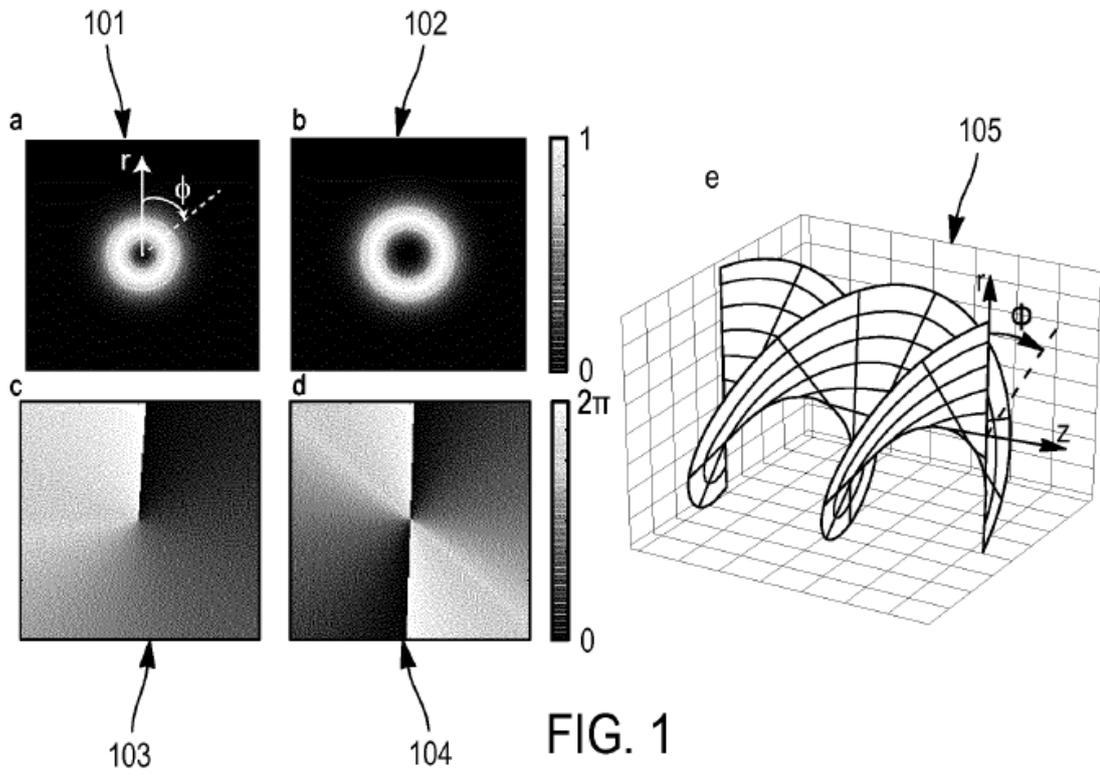
fuentes de calor locales para cambiar longitudinalmente el índice de refracción; y/o la diferencia de longitud óptica acimutal puede ser modularse gracias a algunos dispositivos optoelectrónicos utilizados para modificar el elemento de fase en espiral.

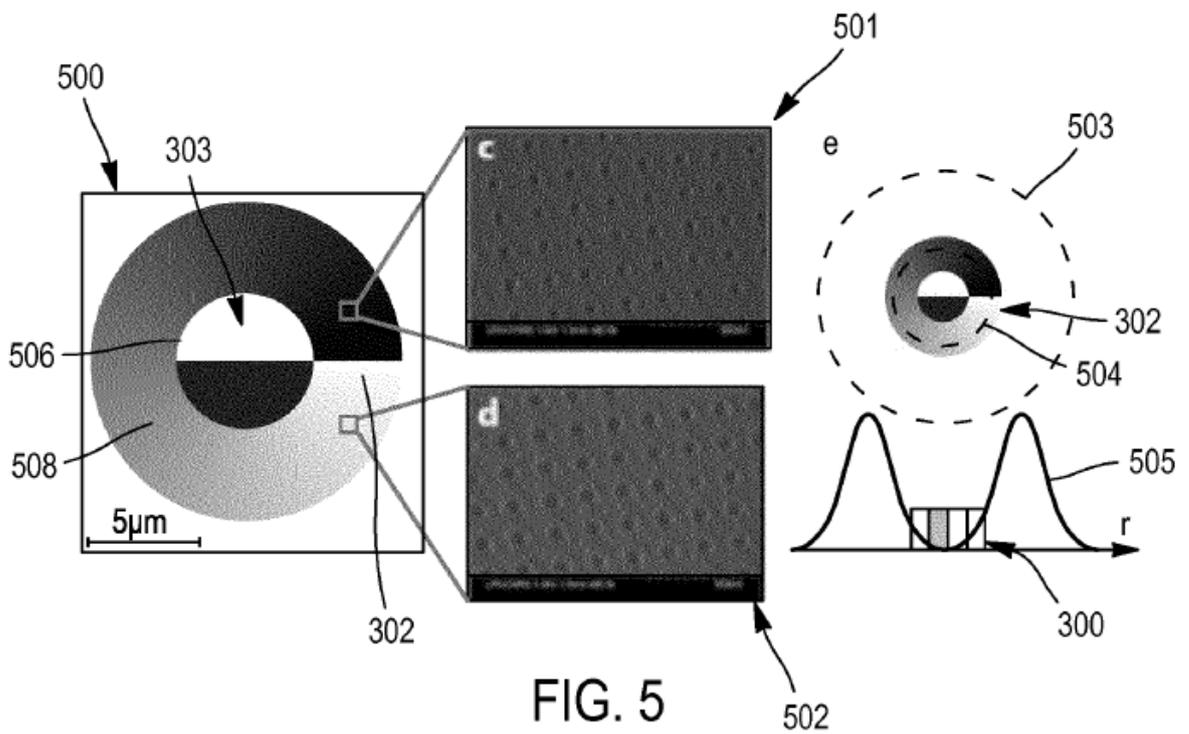
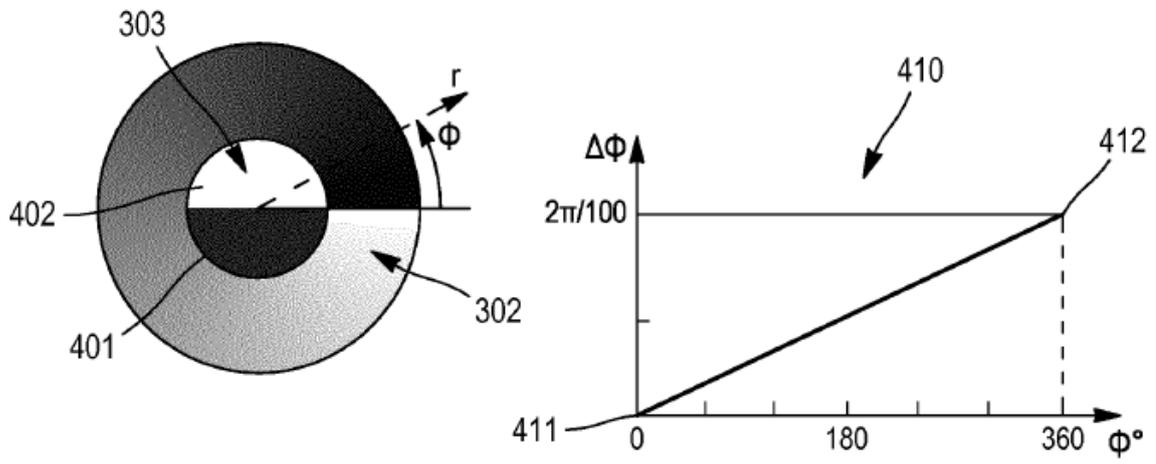
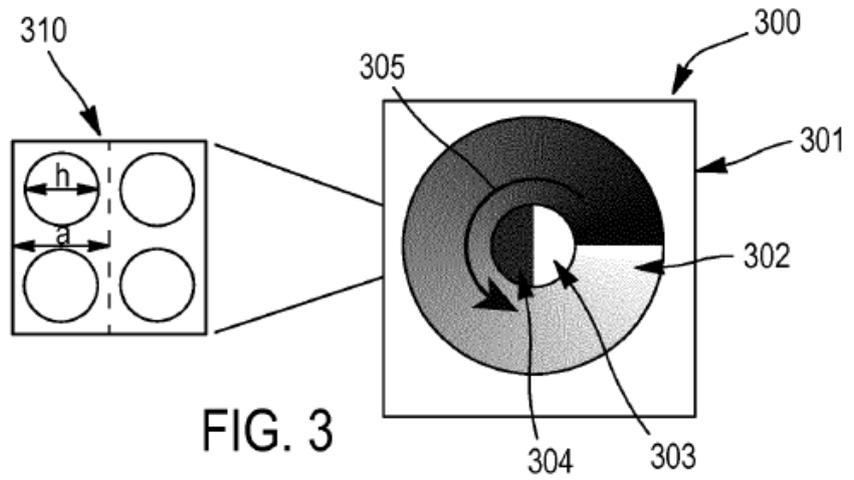
- 5 Por lo tanto, el momento angular orbital puede ser controlado activamente y la carga puede ser ajustada mediante el cambio activo de la longitud de la cavidad, y su signo puede ser sintonizado por medio del cambio activo del signo del SPE.

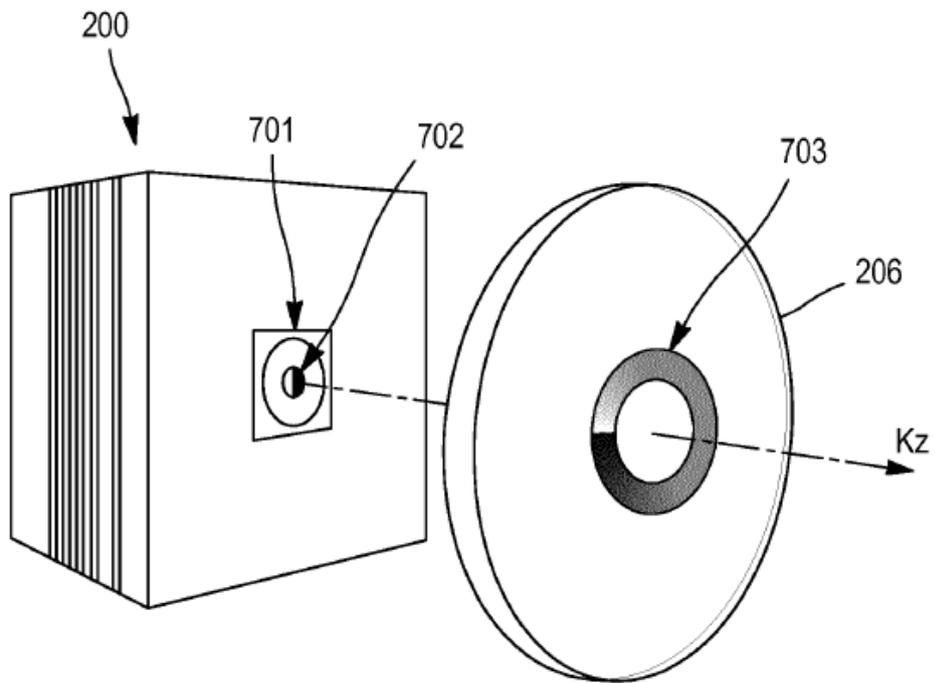
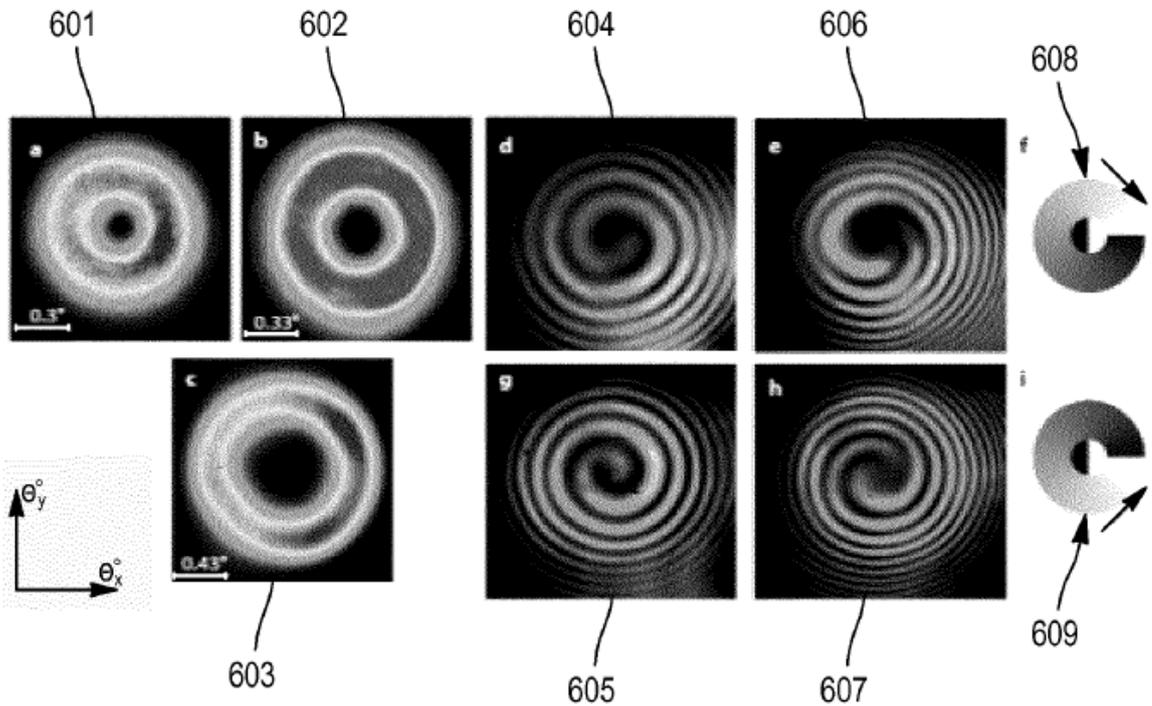
**REIVINDICACIONES**

1. Un dispositivo de láser (250), para generar una onda óptica de fase de forma helicoidal que comprende:
  - una región de ganancia (203), situada entre un primer extremo definido por un primer espejo (202) y un segundo extremo definido por una región de salida,
- 5     - un segundo espejo (206), dispuesto para formar con el primer espejo (202) una cavidad óptica que incluye la región de ganancia (203) y un espacio (207) entre la región de salida y el segundo espejo (206),
  - un medio para bombear la región de ganancia (203) para generar la onda óptica, y
  - por lo menos un medio para conformar los perfiles de la intensidad de la luz y/o la fase de la onda óptica, y dispuesto para seleccionar, por lo menos, un modo transversal rotatorio - simétrico de la onda óptica, siendo elegido dicho modo transversal rotatorio - simétrico de entre aquellos con un índice radial igual a cero y con un índice acimutal que es un número entero con un módulo mayor o igual que 1, estando situados dicho medio para conformar los perfiles de la intensidad de la luz y/o de la fase en el interior de la cavidad óptica,
- 10    caracterizado por que
  - dicho, por lo menos, un medio para conformar los perfiles de la intensidad de la luz y/o de la fase de la onda óptica consiste, por lo menos, en un medio (204) para filtrar transversalmente dicha onda óptica, que comprende las siguientes zonas con funcionalidad:
    - una zona central discoidal (303), que proporciona grandes pérdidas entre un valor mínimo del desplazamiento de fase (401) y un valor máximo del desplazamiento de fase (402),
    - una zona anular (302), situada alrededor del eje longitudinal central y que proporciona desplazamiento modal de fase acimutal, y
    - una zona de absorción con funcionalidad adicional (701) o zona de bombeo (503), situada en una región periférica.
- 15    2. El dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el, por lo menos, un medio (204) para el filtrado transversal de la onda óptica está centrado en un eje longitudinal central.
- 20    3. El dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la zona central discoidal (303) está dividida en dos subzonas, proporcionando la primera subzona (402) el valor mínimo del desplazamiento de fase, y proporcionando la segunda subzona (403) el valor máximo del desplazamiento de fase, proporcionando dicha zona central discoidal pérdidas modales.
- 25    4. El dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la zona angular (302) proporciona, por lo menos, un desplazamiento de fase en espiral perturbador graduado entre el valor mínimo del desplazamiento de fase (411) y el valor máximo del desplazamiento de fase (412) durante un giro como máximo y para un recorrido de ida y vuelta de la onda óptica en la cavidad óptica, proporcionando dicha zona anular un desplazamiento de fase modal comprendido entre  $2\pi * 1 \cdot 10^{-5}$  y  $2\pi/5$ .
- 30    5. El dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que, por lo menos, uno de los medios (204) para filtrado transversal consiste en una única máscara situada en o cerca de una de las siguientes ubicaciones:
  - un antinodo de la onda óptica,
  - sobre la región de ganancia,
  - sobre el segundo espejo (206) superficial.
- 35    6. El dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que, por lo menos, un medio (204) para filtrado transversal consiste en una pluralidad de máscaras, por lo menos, con una zona con funcionalidad y, por lo menos una, de la pluralidad de máscaras está situada en o cerca de un antinodo de la onda óptica.
- 40    7. El dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que, por lo menos, uno de los medios (204) para el filtrado transversal de la onda óptica es un elemento fotónico plano fabricado utilizando tecnología de semiconductores III - V.
- 45    8. El dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los desplazamientos de fase de la zona central discoidal (303) y/o la zona anular (302) son proporcionados mediante variaciones del índice de refracción, por lo menos, de un medio (204) para filtrado transversal.

9. El dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que los valores del desplazamiento de fase de dicha zona central discoidal (303) y dicha zona anular (302) se proporcionan controlando las características dimensionales de la rejilla bidimensional, por lo menos, del un medio (204) para el filtrado transversal.
- 5 10. El dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los medios para bombear la región de ganancia (203) comprenden:
- un láser de bombeo que emite un rayo láser de bombeo,
  - medios dispuestos para configurar espacialmente la intensidad del rayo láser de bombeo,
- 10 caracterizado por que el, por lo menos, un medio para conformar los perfiles de la intensidad luminosa y/o de la fase de la onda óptica comprenden los medios para configurar espacialmente la intensidad del rayo láser de bombeo y están dispuestos para proyectar un patrón de intensidad del haz de bombeo sobre la región de salida correspondiente, por lo menos, con modo transversal rotatorio - simétrico seleccionado de la onda óptica.
11. El dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el medio para bombear la región de ganancia consiste en un bombeo eléctrico de la región de ganancia.
- 15 12. El dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el dispositivo de láser (250) comprende un láser de emisión superficial de cavidad externa vertical
13. El dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el dispositivo de láser comprende, además, por lo menos, una lente intracavitaria cilíndrica o esférica, y en el que el segundo espejo (206) es un espejo de extremo plano.
- 20 14. El dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, por lo menos, un medio para controlar activamente la longitud de onda longitudinal de la cavidad y/o la diferencia de trayectoria óptica acimutal de la cavidad.
15. El dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que comprende, además, por lo menos, un filtro espectral de ancho de banda amplio para seleccionar otro modo longitudinal.
- 25 16. Un método para generar una onda óptica de fase de forma helicoidal, con el dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, por lo menos, las siguientes etapas:
- generar una onda óptica dentro de la región de ganancia (203), oscilando dicha onda óptica en el interior de la cavidad óptica,
  - bombear la onda óptica con medios para bombear, y
  - conformar los perfiles de la intensidad de la luz y/o de la fase de la onda óptica con los medios para conformar los
- 30 perfiles de la intensidad de la luz y/o de la fase para seleccionar, por lo menos, un modo transversal rotatorio - simétrico de la onda óptica entre aquellos con un índice radial igual a cero y con un índice acimutal que es un número entero con un módulo mayor o igual que 1.







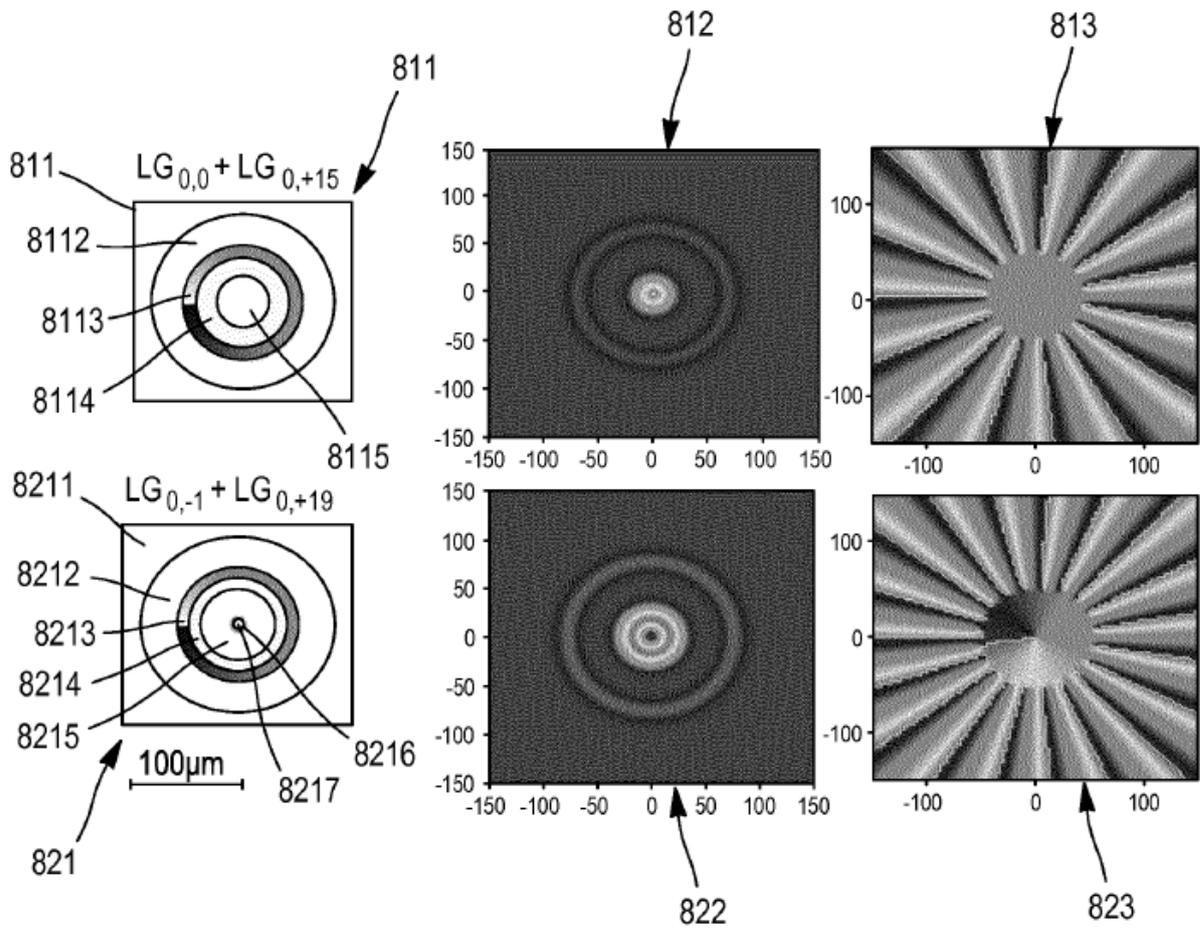


FIG. 8

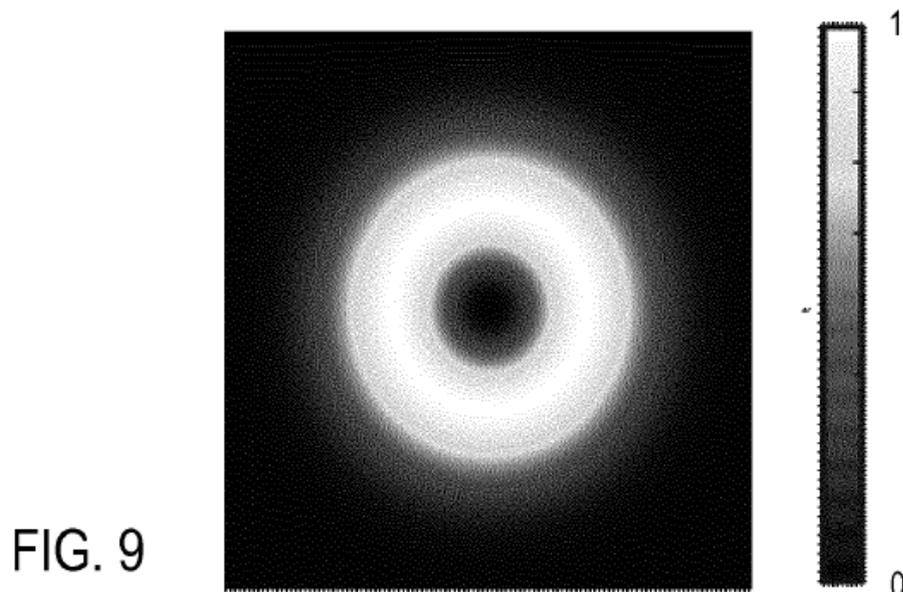


FIG. 9

