

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 389 434**

21 Número de solicitud: 201230105

51 Int. Cl.:

H04B 10/10 (2006.01)

H04B 10/12 (2006.01)

G02F 1/01 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación: **26.01.2012**

43 Fecha de publicación de la solicitud: **26.10.2012**

43 Fecha de publicación del folleto de la solicitud:
26.10.2012

71 Solicitante/s:
UNIVERSITAT AUTONOMA DE BARCELONA
Edifici A, Campus universitari s/n
08193 Bellaterra (Cerdanyola del Valles),
Barcelona, ES

72 Inventor/es:
MOMPART PENINA, Jordi;
KIRILOV KALKANDJIEV, Todor;
TURPÍN AVILES, Alejandro y
LOIKO, Yurii

74 Agente/Representante:
No consta

54 Título: **Sistema, método, transmisor y receptor de comunicaciones ópticas**

57 Resumen:

Sistema, método, transmisor y receptor de comunicaciones ópticas.

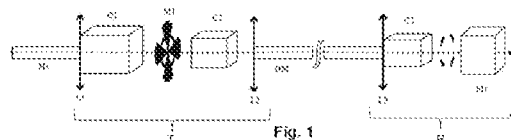
El sistema comprende:

- un transmisor (T) formado por un demultiplexor y un multiplexor con unos elementos ópticos (C1, C2) que, junto con un modulador (M1) dispuesto entre ellos, permiten utilizar los sub-haces que componen un haz de luz de entrada (H1) como canales ópticos para la transmisión de datos, en la forma de un haz de luz multiplexado (HM); y

- un receptor (R) dispuesto para recibir dicho haz, tras haber viajado por el medio de transmisión, y que comprende un demultiplexor con un elemento óptico (C3) que recupera los canales ópticos del haz de luz multiplexado (HM).

El método está adaptado para implementarse utilizando el sistema de la invención.

El transmisor y el receptor están adaptados para realizar las funciones de, respectivamente, el transmisor y el receptor del sistema de la invención.



ES 2 389 434 A1

DESCRIPCION

Sistema, método, transmisor y receptor de comunicaciones ópticasSector de la técnica

La presente invención concierne, en un primer aspecto, a un sistema de comunicaciones ópticas que permite la codificación y transmisión de información en un haz de luz, y más particularmente a un sistema que incluye una serie de elementos ópticos que permiten utilizar los sub-haces que componen el haz de luz como canales ópticos para el transporte de datos.

En un segundo aspecto, la invención concierne a un método adaptado para implementarse utilizando el sistema del primer aspecto.

Unos tercer y cuarto aspectos de la invención conciernen a un transmisor y un receptor adaptados para realizar las funciones de, respectivamente, el transmisor y el receptor del sistema del primer aspecto de la invención.

15 Estado de la técnica anterior

Las conexiones mediante láser son actualmente utilizadas para FSOC (del inglés "Free-Space Optical Communications": Comunicaciones Ópticas en el Espacio Libre) de punto a punto en grandes distancias. La mayoría de ventajas sobre otras tecnologías de comunicación provienen de la gran coherencia alcanzada en radiación láser y la baja divergencia del haz. Se considera que las tecnologías de FSOC mediante láseres son las de mayor eficiencia y ritmo de datos (en ancho de banda y capacidad) para cualquier canal óptico en espacio libre. Estas ventajas son cruciales para las comunicaciones ópticas en el espacio profundo [1], sin olvidar que las conexiones mediante láser pueden ser consideradas incluso como una alternativa (o una herramienta/canal adicional) a las comunicaciones ópticas de radiofrecuencia y con fibras para algunas aplicaciones terrestres.

Diferentes propiedades de los campos ópticos pueden ser exploradas para codificar y decodificar eficientemente la información. Hasta el momento se han desarrollado técnicas eficientes para el procesado de la señal en fuentes láseres de alta modulación en frecuencia, sensores ultrarrápidos y otros componentes ópticos y electrónicos ultrarrápidos. Además, la capacidad de un canal de comunicación puede ser notablemente incrementada si uno combina eficientemente y descompone (sin pérdida de la información) haces con características ligeramente diferentes tal como, por ejemplo, hace la técnica de multiplexado por división de longitud de onda (WDM), que ha sido desarrollada para comunicaciones con fibra óptica.

Con tal de incrementar la capacidad del canal en FSOC, se ha considerado utilizar el momento angular orbital (OAM) de la luz para codificar información en un haz láser monocromático [2-5]. De esta manera, como el OAM de la luz puede ser descompuesto en un número infinito de estados ortogonales, i.e., los ampliamente conocidos modos propios TEM_{pl} dados por las funciones de Laguerre-Gauss, la capacidad del canal puede ser arbitrariamente incrementada, en principio. No obstante, existen inconvenientes prácticos que dificultan la codificación de información en el OAM de la luz [6-8] tales como el hecho de que órdenes elevados de modos de OAM presentan una gran divergencia y, en consecuencia, no pueden ser utilizados para FSOC en distancias largas. Es por ello que hoy en día no existe un sistema factible de comunicación basado en el multiplexado mediante OAM.

Por otra parte, el fenómeno de la refracción cónica, o CR (del inglés "Conical Refraction") es conocido por diversas referencias [9-17], aunque a pesar de ser un fenómeno descubierto en 1832 [10] su aprovechamiento para la implementación de sistemas ópticos con aplicaciones concretas ha sido hasta ahora escaso.

Una de tales implementaciones se haya descrita en WO2010084317A1, donde se propone un sistema óptico con una fuente óptica de entrada, tal como un láser, para proyectar un haz de luz de entrada a lo largo de un eje óptico y un elemento óptico que crea un haz de refracción cónica a partir del haz de entrada, proyectando en el plano de Lloyd un anillo de luz y subsiguientemente reconstruye el haz de entrada a partir del anillo de luz. El elemento óptico comprende uno o más elementos de refracción cónica que, en alguna de las realizaciones, se encuentran orientados inversamente.

El objetivo del sistema propuesto en WO2010084317A1 es el de generar un haz de luz, tal como una haz láser, que tenga un alto rendimiento en términos de potencia y calidad, así como una gran eficiencia.

No se enseña ni se sugiere en WO2010084317A1 la utilización del sistema óptico allí propuesto para otros fines que no sean los indicados y relativos a la mejora de las características del haz de luz suministrado, no sugiriéndose en absoluto la utilización de tal sistema para la transmisión de datos.

En JP58202422A se propone realizar un multiplexado óptico sin utilizar un elemento de selección de longitud de onda, proporcionando para ello un pequeño dispositivo que utiliza la refracción cónica de un cristal óptico biaxial, y que permite multiplexar la luz proveniente de una pluralidad de fuentes de luz a una fibra óptica de

salida dispuesta en una cara de salida del cristal, donde la luz de cada una de las fuentes de luz se transmite a través de un respectivo conducto de fibra óptica con un extremo que incide sobre una cara de entrada del cristal opuesta a dicha cara de salida cristal. Los extremos de las fibras ópticas que contactan el cristal, tanto las de entrada como la de salida, deben fijarse justamente en unos puntos predeterminados con el fin de que, en teoría, debido a la refracción cónica, la luz de todos los haces de entrada converja en el punto de salida. Pero en la práctica esto no es así, debido al inconveniente principal del que adolece la propuesta hecha en JP58202422A, que es el siguiente:

10 Cada fuente de luz mencionada en JP58202422A produce un anillo de refracción cónica en la cara de salida del cristal. En el caso de que las fuentes de entrada estén desplazadas entre sí, los anillos de CR en la superficie de salida del cristal biaxial serán desplazados en la misma cantidad. Por lo tanto, para N fuentes de luz en la superficie de entrada, aparecerán N anillos de CR en la superficie de salida.

15 Además, en la superficie de salida estos anillos de CR se cruzan en unos puntos, pero no se superponen totalmente entre sí. Esto impide que puedan ser recogidos adecuadamente por una fibra colocada en la superficie de salida del cristal biaxial.

Explicación de la invención

20 Aparece necesario ofrecer una alternativa al estado de la técnica que cubra las lagunas halladas en el mismo, en particular las existentes en los sistemas de comunicaciones basados en el multiplexado OAM, y que permita su utilización para FSOC en distancias largas.

25 Con tal fin, la presente invención concierne, en un primer aspecto, a un sistema de comunicaciones ópticas, que comprende, de manera en sí conocida:

- un transmisor configurado para transmitir y codificar información en un haz de luz a través de un medio de transmisión; y
 - un receptor dispuesto para recibir dicho haz, tras haber viajado por dicho medio de transmisión, y configurado para decodificar dicha información codificada
- 30 incluida en el haz de luz.

A diferencia de las propuestas conocidas, en el sistema propuesto por el primer aspecto de la presente invención, de manera característica:

- el transmisor comprende:
 - un demultiplexor formado por como mínimo un primer elemento óptico
- 35 dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, un haz de luz

inicial, demultiplexarlo cambiando la dirección de los vectores de onda de al menos dos de los sub-haces que componen dicho haz de luz inicial, y suministrar dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo;

5 - al menos un modulador dispuesto y configurado para realizar dicha codificación de información modulando en amplitud dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas, cada uno de ellos constituyendo un canal óptico; y

10 - un multiplexor formado por al menos un segundo elemento óptico dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, la luz de dichos canales ópticos, y suministrar dichos canales ópticos multiplexados hacia dicho medio de transmisión en la forma de un haz de luz multiplexado, por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo,

15 y el receptor comprende un demultiplexor formado por al menos un tercer elemento óptico dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, a dicho haz de luz multiplexado, y suministrar, por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo, dichos canales ópticos recuperados tras demultiplexar al haz de luz multiplexado, cambiando la dirección de los vectores de onda de los sub-haces, que son al menos dos, que componen el haz de luz multiplexado.

20

Lo que en la presente memoria descriptiva y reivindicaciones adjuntas se denomina como sub-haces son haces que componen el haz de luz inicial o el haz de luz multiplexado, habiéndose utilizado el término “sub-haz” simplemente para mayor claridad en la descripción, evitando así confusiones entre los haces aquí denominados

25 como sub-haces y los haces compuestos por tales sub-haces.

Para un ejemplo de realización preferido:

30 - el primer elemento óptico es un primer cristal biaxial de refracción cónica, dispuesto y configurado para demultiplexar dicho haz de luz inicial cambiando la dirección de los vectores de onda de los sub-haces que lo componen, suministrando dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas de manera que su proyección en un plano adopta la forma de un anillo de luz, donde los sub-haces con vectores de onda en un mismo plano van a parar a sectores diametralmente opuestos del anillo de luz;

35 - el modulador o los moduladores están dispuestos y configurados para realizar dicha codificación de información modulando en amplitud, en dicho plano de proyección

o en otro u otros planos, los sub-haces correspondientes a diferentes sectores de dicho anillo de luz, o canales ópticos;

- y los segundo y tercero elementos ópticos son unos respectivos segundo y tercero cristales biaxiales de refracción cónica.

5

Los términos anillo de luz no deben entenderse en la presente memoria descriptiva y reivindicaciones adjuntas como restrictivos en cuanto a uniformidad radial, pudiendo cubrir tanto anillos perfectamente circulares como ovalados.

10 Los ejes ópticos de los primero y segundo elementos ópticos se encuentran, en general, alineados entre sí.

Para un ejemplo de realización, el segundo cristal biaxial de refracción cónica es substancialmente de iguales dimensiones que el primero.

15 El segundo cristal biaxial de refracción cónica se encuentra orientado inversamente con respecto al primero, es decir a una distancia angular de 180° alrededor de su eje óptico, según un ejemplo de realización preferido.

Para otro ejemplo de realización el segundo cristal biaxial de refracción cónica se encuentra orientado con respecto al primero una distancia angular diferente de 180° .

20 Para otro ejemplo de realización, los primer, segundo y tercer elementos ópticos son unos cristales fotónicos. Es conocido que las características de los cristales fotónicos pueden ser modificados mediante la variación de su estructura y materiales de que están hechas. Los cristales fotónicos usados en el sistema propuesto por el primer aspecto de la invención tienen tal estructura que permiten una separación de las ondas de la luz de manera análoga a como lo hacen los cristales biaxiales.

25 Para otro ejemplo de realización, los primer, segundo y tercer elementos ópticos son otra clase de elementos ópticos diseñados para realizar las funciones explicadas.

30 Según un ejemplo de realización, el haz de luz inicial es de tipo Gaussiano, aunque el sistema es aplicable también, para otros ejemplos de realización, a cualquier haz que forme parte de los modos Laguerre-Gauss o Hermite-Gauss, en función del nivel de divergencia permitido por la aplicación donde se implemente el sistema y de, sobre todo, la distancia existente entre el transmisor y el receptor.

35 Por lo que se refiere al haz de luz multiplexado, éste es en general similar a un haz Gaussiano, por lo menos por lo que se refiere a características de divergencia, por lo que la distancia que puede recorrer hasta llegar al receptor, sin divergencia entre los

distintos canales que lo conforman, es considerable, del mismo orden que la distancia recorrida por un haz gaussiano.

En cuanto al medio de transmisión, éste es, para un ejemplo de realización un medio isotrópico, tal como el espacio libre, siendo por tanto el presente sistema
5 adecuado para llevar a cabo las conocidas comunicaciones FSOC, del inglés "Free Space Optical Communication".

Para otro ejemplo de realización, el medio de transmisión es una guía de ondas, constituida por ejemplo por fibra óptica.

En cuanto al tipo de modulador utilizado en el sistema del primer aspecto de la
10 invención, en función del ejemplo de realización éste comprende como mínimo una máscara de amplitud angular dispuesta en dicho plano donde se forma el anillo de luz o en otro plano o un modulador conocido como SLM, de las siglas "Spatial Light Modulator", es decir modulador de luz espacial.

Por lo que se refiere al haz de luz inicial, éste es en función del ejemplo de
15 realización un haz de luz monocromático o un haz de luz policromático.

De acuerdo con un ejemplo de realización, el modulador está configurado para modular de manera independiente a parte o a todos los canales ópticos, mediante modulación espacial o modulación espacial y temporal.

Para otro ejemplo de realización, el modulador está configurado para modular de
20 manera dependiente a como mínimo parte de los canales ópticos, mediante modulación espacial o modulación espacial y temporal.

Según un ejemplo de realización, el transmisor comprende también como mínimo una primera lente dispuesta frente al primer extremo del primer elemento óptico
25 para enfocar el haz de luz inicial sobre el mismo, y al menos una segunda lente dispuesta tras el segundo extremo del segundo elemento óptico para colimar dicho haz de luz multiplexado.

El receptor comprende, asimismo, para un ejemplo de realización, al menos un objetivo dispuesto frente al primer extremo del tercer elemento óptico, para que éste
30 reciba al haz de luz multiplexado tras atravesar el objetivo, y como mínimo un dispositivo fotodetector (tal como un dispositivo CCD) dispuesto frente al segundo extremo del tercer elemento óptico para recibir la luz de los canales ópticos y procesar la información contenida en los mismos.

35 El sistema comprende, para unos ejemplos de realización, disponer en cascada dos o más grupos como el descrito hasta aquí, alineados entre sí o con sus respectivos

ejes ópticos formando ángulo, dirigiéndose en este último caso el haz de luz de salida de un grupo óptico hacia la entrada del grupo óptico consecutivo mediante un elemento óptico que desvía la dirección del haz (tal como un reflector o un prisma).

Es decir que el sistema comprende, para dichos ejemplos de realización, tras el
5 tercer elemento óptico, como mínimo un grupo óptico que incluye:

- al menos un segundo modulador dispuesto y configurado para codificar información modulando en amplitud los canales ópticos recuperados por el tercer elemento óptico,

- al menos un segundo multiplexor formado por como mínimo un cuarto
10 elemento óptico dispuesto y configurado para multiplexar los canales ópticos codificados por el segundo modulador, y

- al menos un segundo demultiplexor formado por como mínimo un quinto elemento óptico dispuesto y configurado para demultiplexar al haz de luz multiplexado por el segundo multiplexor.

15

Tras dicho segundo demultiplexor, o tras el último demultiplexor para un ejemplo de realización para el que se dispongan más de dos grupos ópticos como los descritos, el sistema comprende un dispositivo fotodetector para recibir la luz de los canales ópticos y procesar la información contenida en los mismos, como parte de un último
20 receptor dispuesto al final de la línea de grupos ópticos.

Según otro ejemplo de realización, el sistema combina tramos que incluyen uno o más de los grupos ópticos descritos con tramos formados por otra clase de dispositivos de comunicación, óptica o de otra índole (en este último caso implementando la necesaria conversión de señales ópticas a la magnitud utilizada por
25 los dispositivos de comunicación de otra clase).

Un segundo aspecto de la invención concierne a un método de comunicaciones ópticas, que comprende:

- a) transmitir y codificar información en un haz de luz a través de un medio de
30 transmisión; y

- b) recibir dicho haz de luz, tras haber viajado por dicho medio de transmisión, y decodificar dicha información codificada incluida en el haz de luz.

A diferencia de los métodos conocidos, en el propuesto por el segundo aspecto de la invención, la etapa a) comprende:

- 35 - emitir un haz de luz inicial hacia un primer elemento óptico;

5 - recibir, mediante dicho primer elemento óptico, dicho haz de luz inicial, demultiplexarlo cambiando la dirección de los vectores de onda de al menos dos de los sub-haces que componen dicho haz de luz inicial, y suministrar dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas;

- realizar dicha codificación de información modulando en amplitud dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas, cada uno de ellos constituyendo un canal óptico; y enviar la luz de dichos canales ópticos a un segundo elemento óptico; y

10 - recibir y multiplexar, mediante dicho segundo elemento óptico, la luz de dichos canales ópticos, suministrando dichos canales ópticos multiplexados hacia dicho medio de transmisión en la forma de un haz de luz multiplexado,

15 y la etapa b) comprende recibir y demultiplexar, mediante un tercer elemento óptico, dicho haz de luz multiplexado, suministrando dichos canales ópticos recuperados tras demultiplexar al haz de luz multiplexado, cambiando la dirección de los vectores de onda de los sub-haces, que son al menos dos, que componen el haz de luz multiplexado.

20 Para un ejemplo de realización preferido, los primer, segundo y tercer elementos ópticos son unos respectivos primer, segundo y tercer cristales biaxiales de refracción cónica, donde cada una de dichas demultiplexaciones de las etapas a) y b) comprende cambiar la dirección de los vectores de onda de los sub-haces que componen el haz de luz inicial, por lo que se refiere a la etapa a), y el haz multiplexado, por lo que se refiere a la etapa b), suministrando dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas de manera que su proyección en un plano adopta la forma de un anillo de luz, donde los sub-haces con vectores de onda en un mismo plano van a parar a sectores diametralmente opuestos del anillo de luz.

El método del segundo aspecto de la invención está previsto para implementarse utilizando el sistema del primer aspecto.

30 Por lo que se refiere al haz de luz inicial, éste es en función del ejemplo de realización un haz de luz monocromático o un haz de luz policromático.

En función del ejemplo de realización, el mencionado haz de luz inicial está polarizado lineal o circularmente, o está depolarizado.

35 Un tercer aspecto de la invención concierne a un transmisor de comunicaciones ópticas, que está configurado para transmitir y codificar información en un haz de luz a

través de un medio de transmisión, donde, a diferencia de los transmisores conocidos, comprende:

- 5 - un demultiplexor formado por al menos un primer elemento óptico dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, un haz de luz inicial, demultiplexarlo cambiando la dirección de los vectores de onda de al menos dos de los sub-haces que componen dicho haz de luz inicial, y suministrar dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo;
- 10 - un modulador dispuesto y configurado para realizar dicha codificación de información modulando en amplitud dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas, cada uno de ellos constituyendo un canal óptico; y
- 15 - un multiplexor formado por al menos un segundo elemento óptico dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, la luz de dichos canales ópticos, y suministrar dichos canales ópticos multiplexados hacia dicho medio de transmisión en la forma de un haz de luz multiplexado, por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo.

20 El transmisor del tercer aspecto de la invención está configurado, según diferentes ejemplos de realización, para hacer las funciones del transmisor del sistema del primer aspecto, es decir que el transmisor descrito como incluido en el sistema del primer aspecto de la invención es, para unos ejemplos de realización, el propuesto por el tercer aspecto.

25

 Un cuarto aspecto de la invención concierne a un receptor de comunicaciones ópticas que está dispuesto para recibir un haz de luz que incluye información codificada, tras haber viajado por un medio de transmisión, y configurado para decodificar dicha información codificada incluida en el haz de luz, comprendiendo el

30 receptor, de manera característica, un demultiplexor formado por como mínimo un elemento óptico dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, a un haz de luz con información codificada en unos canales ópticos correspondientes a unos sectores de luz multiplexados en dicho haz de luz, y suministrar, por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo, dichos canales ópticos recuperados tras

35 demultiplexar el haz de luz multiplexado cambiando la dirección de los vectores de onda de los sub-haces que componen el haz de luz multiplexado.

El receptor del cuarto aspecto de la invención está configurado, según diferentes ejemplos de realización, para hacer las funciones del receptor del sistema del primer aspecto, es decir que el receptor descrito como incluido en el sistema del primer aspecto de la invención es, para unos ejemplos de realización, el propuesto por el
5 cuarto aspecto.

Breve descripción de los dibujos

Las anteriores y otras ventajas y características se comprenderán más
10 plenamente a partir de la siguiente descripción detallada de unos ejemplos de realización con referencia a los dibujos adjuntos, que deben tomarse a título ilustrativo y no limitativo, en los que:

la Fig. 1 es una vista esquemática, en perspectiva, del sistema propuesto por el primer aspecto de la invención, para un ejemplo de realización para el que los
15 elementos ópticos son unos cristales biaxiales de refracción cónica;

la Fig. 2 muestra unas imágenes experimentales obtenidas para el sistema de la Fig. 1 utilizando máscaras para multiplexado con 2 (a), 4 (b), 6 (c), 8 (d), 10 (e), 12 (f) y 36 (g) aperturas angulares, ilustradas en la primera fila; la segunda fila muestra los haces multiplexados producidos por el transmisor, mientras que en la tercera fila
20 pueden verse los patrones demultiplexados por el receptor;

la Fig. 3 muestra, de manera esquemática, el sistema correspondiente a un caso degenerado de CR en 2-cascada, en el cual está basado el sistema propuesto por la presente invención;

la Fig. 4 muestra, con relación al sistema de la Fig. 3, diferentes capturas
25 realizadas con un dispositivo CCD para un haz de entrada Gaussiano (a-c), fuertemente elíptico (d-f) y obtenido con una máscara de amplitud de 8-estrellas; la primera columna representa las imágenes de los haces de entrada, la segunda columna el patrón de intensidad en el plano focal y la última columna muestra los haces de salida; y

las Figs. 5a y 5b muestran, de manera esquemática, al sistema propuesto por la
30 invención, para un ejemplo de realización diferente al de la Fig. 1, para el que el sistema es bidireccional, ilustrándose en la Fig. 5a el camino de un haz que entra por la izquierda, y en la Fig. 5b la trayectoria de un haz que entra por la derecha, según la posición ilustrada del sistema.

35 Descripción detallada de unos ejemplos de realización

En el presente apartado se describirán unos ejemplos de realización con referencia a las Figuras adjuntas representativos del caso preferido descrito anteriormente, es decir el que utiliza como elementos ópticos cristales biaxiales de refracción cónica.

5 En primer lugar se hace una explicación de la idea central sobre la que se sustenta el sistema propuesto por la presente invención, por lo que se refiere a su ejemplo de realización preferido para el que el transmisor de éste comprende dos cristales biaxiales de refracción en una disposición que se denomina caso degenerado de CR en 2-cascada.

10

El caso degenerado de CR en 2-cascada (esto es, con dos cristales) con CREs opuestamente orientados es la idea central del ejemplo de realización preferido de la presente invención, para codificación de la información de un haz monocromático Gaussiano. Consiste en una cascada de dos CREs con idéntica longitud
 15 (preferentemente <100 nm de diferencia) con sendos vectores- Λ opuestamente orientados, colocados entre una pareja de lentes focalizadora/colimadora LF/LC, tal y como se ilustra en la Fig. 3. El primer cristal CRE1 transforma el haz Gaussiano inicial H_i en el anillo de CR, proyectado en el plano focal PF, y el segundo cristal CRE2 transforma dicho anillo hacia el haz Gaussiano inicial, en la forma de un haz de salida
 20 H_o . Dicho de otra manera, la CR en 2-cascada degenerada puede ser considerada como una transformación directa-inversa 2D de un haz monocromático, de manera análoga a la transformada de Fourier bidimensional.

Los ampliamente conocidos modos TEM_{pl} formados por funciones de Laguerre-Gauss constituyen una base completa para representar cualquier campo de luz cuya
 25 amplitud transversal y polarización presenten simetría cilíndrica. La distribución de intensidad de un haz de CR producida por un haz Gaussiano circularmente polarizado tiene simetría cilíndrica. No obstante, los haces de CR no pueden ser representado en términos de los modos TEM_{pl} . De hecho, los últimos tienen una simetría tal que el vector de campo eléctrico para cada dos puntos situados opuestamente de manera
 30 relativa al eje de simetría son o bien colineales o bien anti-colineales. En cambio, los vectores de campo eléctrico de dos puntos opuestos del anillo de CR son siempre perpendiculares. En consecuencia, los modos TEM_{pl} no pueden ser utilizados como una base para representar el haz refractado cónicamente. De la misma manera, se puede concluir que los modos de Hermite-Gauss, así como otros modos más exóticos
 35 tales como los de Ince-Gauss o los hipergeométricos, tampoco pueden ser utilizados

como una base de representación de la CR. Por este motivo, hay que enfocar la descomposición del haz de CR desde un acercamiento alternativo.

Las investigaciones llevadas a cabo por los presentes inventores ya han mostrado que existen haces, conocidos como haces filtrados de CR [17], que no producen un anillo de CR cuando se propagan a lo largo de del eje óptico de un cristal biaxial. Estos haces se dividen, en general, en dos haces diagonalmente posicionados en puntos opuestos del anillo de CR que es de esperar en cualquier otro caso. Las intensidades de dichos haces divididos cambia bajo la rotación del CRE, de manera similar a como pasa en la refracción doble en calcita. Para algunas orientaciones particulares del CRE, uno de los haces divididos tiene intensidad nula y, usando una analogía con el ampliamente conocido fenómeno de la refracción doble, se identifican estos haces filtrados como modos propios de luz del efecto de la CR. Estos modos propios son de gran utilidad para describir la propagación de cualquier haz inicial con un patrón de intensidad arbitrario a lo largo de la configuración de CR en 2-cascada degenerada.

La Fig. 4 muestra los resultados de dichas investigaciones en la propagación de tres haces de entrada con patrones transversales diferentes a lo largo de una configuración de CR en 2-cascada degenerada. De manera clara, sólo el haz Gaussiano (ver Fig. 4(a)) produce el anillo de CR (ver Fig. 4(b)) después de pasar a lo largo del primer CRE, restaurándose el anillo hacia el haz inicial (ver Fig. 4(c)) tras pasar por el segundo CRE.

Para generar el haz con forma fuertemente elíptica de la Fig. 4(d) se utilizó una rendija de $25\mu\text{m}$ de apertura para seleccionar solamente la parte central de un haz Gaussiano. En este caso, de manera similar al caso de haces filtrados de CR, se obtuvieron únicamente dos haces refractados. Si, además, este haz incidente está linealmente polarizado, entonces existe una orientación específica del primer CRE para la cual sólo se observa un haz en el plano focal. Es en este sentido que los haces linealmente polarizados con un perfil fuertemente elíptico son identificados como modos propios de luz para el fenómeno de la CR.

Un haz Gaussiano puede ser representado por la transformada de Fourier como una superposición de ondas planas con diferentes vectores de onda k . El haz fuertemente elíptico (ver Fig. 4(d)) puede ser visto como compuesto por ondas planas cuyos vectores- k se encuentran confinados en un plano, conocido como plano K , de manera que el haz Gaussiano incidente puede ser considerado como una suma infinitesimal de modos propios, es decir de haces fuertemente elípticos con diferentes planos K . Después del primer CRE, cada haz caracterizado por un plano K es

proyectado en dos puntos opuestos de lo que debería ser un anillo de CR (ver Fig. 4(e)) y, después del segundo CRE, ambos puntos son restaurados hacia el haz inicial conservando el plano K, ver Fig. 4(f).

Alternativamente, se puede expresar la operatividad de la 2-cascada degenerada teniendo en cuenta que un haz Gaussiano es espacialmente demultiplexado en un anillo de CR de tal manera que cada pareja de puntos opuestos (con polarizaciones ortogonales) representan un plano K del haz Gaussiano incidente. Para el caso con n planos K ($n = 4$ en la Fig. 4(g)), el anillo de CR tendrá $2n$ puntos opuestos (8 en Fig. 4(h)). Los miembros de cada par de haces de puntos opuestos se unen de nuevo (multiplexado) después del segundo CRE en un solo haz, haciendo que el haz inicial sea reproducido después del segundo CRE; comparar Figs. 4(i) y (g). El segundo cristal CRE2, que realiza la transformada inversa, puede ser visto como un multiplexor. Hay que hacer notar que la intensidad de cada punto del anillo de luz CR antes del elemento de multiplexado (segundo CRE), puede ser modulada independientemente, permitiendo un aumento de la capacidad del canal transportado por el haz Gaussiano.

Una vez explicado el estudio realizado sobre el caso degenerado de CR en 2-cascada, que es la base del ejemplo de realización preferido del sistema propuesto por el primer aspecto de la invención, a continuación se describe éste, el cual está diseñado para codificar y decodificar información mediante CR, explicándose en lo que sigue en términos de las tres partes fundamentales de un sistema de comunicación óptica en FSOC, i.e., el transmisor T, la propagación en espacio libre propiamente dicha y el receptor R, con referencia a la Fig. 1.

El transmisor T comprende dos cristales biaxiales C1 y C2, que proporcionan la transformación directa-inversa, una máscara de amplitud angular M1 que se utiliza como modulador de luz y una lente L1 para focalizar el haz de entrada H1 y otra lente L2 para colimar el haz de salida Ho.

Hay que indicar que si bien en la Fig. 1 se han ilustrado los cristales C1 y C2 con diferentes tamaños, los resultados ilustrados en la Fig. 2 corresponden a una implementación del sistema de la Fig. 1 donde C1 y C2 tienen un mismo tamaño, que se indicará a continuación, y se encuentran orientados inversamente.

Para el haz inicial H1, se ha utilizado, para la prueba experimental cuyos resultados se ilustran en la Fig. 2, un haz Gaussiano polarizado circularmente y

colimado con un radio de cintura sin focalizar de $w_0 = 1,5$ mm obtenido de un diodo láser a 640 nm acoplado a una fibra monomodo. La 2-cascada degenerada de CR es preparada con dos cristales biaxiales idénticos de $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ tales que ofrecen un anillo después del primer cristal C1 de 1,5 mm de radio. Para focalizar y colimar el haz, se han utilizado lentes L1, L2 con una distancia focal de 200 mm. El protocolo de demultiplexado puede ser dividido en los pasos siguientes:

- (i) El primer CRE, o elemento de refracción cónica, C1 demultiplexa el haz Gaussiano H1 en un anillo cuyos puntos son líneas o canales de comunicación independientes. Cada punto del anillo puede ser separado correctamente y modulado.
- (ii) Como elemento de modulación M1 se han utilizado máscaras de amplitud con n (hasta 36) sectores circulares abiertos, cada una de ellas colocada, de manera alternativa, en el plano donde se proyecta el anillo de luz, para seleccionar algunas partes del anillo de CR.

(iii) El segundo CRE C2, idéntico y orientado inversamente con respecto al primero (para la prueba experimental aquí descrita), a través de cuyo eje óptico pasan las partes del anillo de luz seleccionadas por la máscara utilizada como modulador M1, y se encarga de hacer la transformación inversa del haz, es decir multiplexa los sectores modulados en un haz de salida HM con una divergencia comparable con la del haz incidente H1.

En la Fig. 2 se ilustran las imágenes experimentales obtenidas utilizando máscaras para multiplexado con 2 (a), 4 (b), 6 (c), 8 (d), 10 (e), 12 (f) y 36 (g) aperturas angulares. La segunda fila muestra los haces multiplexados producidos por el transmisor T, mientras que en la tercera fila pueden verse los patrones demultiplexados por el receptor R.

En el montaje experimental aquí descrito, la propagación en espacio libre fue de alrededor de 1,5 m. Es importante resaltar que la máscara utilizada tiene influencia en el perfil pero no en la divergencia del haz multiplexado HM, ver segunda fila en Fig. 2, cosa que permite utilizar el sistema propuesto por la invención en distancias de propagación largas.

En cuanto al receptor R, éste consiste en un objetivo L3 con distancia focal de 50 mm, un tercer CRE C3 de 12 mm de largo, que demultiplexa el haz multiplexado HM, y una cámara CCD, como dispositivo de fotodetección FD, que captura el haz patrón resultante. El CRE C3 demultiplexa el haz propagado en espacio libre HM,

mediante el fenómeno de CR y recupera los sectores modulados por el transmisor T. Como se puede observar en la tercera fila de imágenes en la Fig. 2, es posible modular de manera clara hasta 12 sectores sin interferencias los unos con los otros, es decir con unas características de divergencia comparables a las de un haz Gaussiano.

5 En el presente apartado se han mostrado los resultados obtenidos de una investigación detallada hecha por los presentes inventores sobre la propiedad de la transformada directa e inversa de un haz de luz entrante propagado a lo largo del eje óptico de un montaje de CR en 2-cascada degenerado donde se usan dos cristales biaxiales opuestamente orientados, que ha demostrado ser una configuración a utilizar
10 como una técnica novedosa para el multiplexado y demultiplexado de haces ópticos monocromáticos, según la presente invención. Esta técnica puede ser utilizada para incrementar la capacidad del canal en FSOC.

De hecho, mediante la implementación experimental descrita con referencia a las figuras adjuntas, se ha mostrado un aumento en un orden de magnitud de la
15 capacidad del canal en una distancia de propagación de 1,5 m, de tal manera que la divergencia del haz resultante no supera a la del incidente. Esta técnica puede ser implementada tanto con luz coherente como incoherente y puede ser extendida a cualquier longitud de onda para la que el cristal biaxial sea transparente. Hay que añadir que, si se envía un haz policromático, cada longitud de onda puede ser
20 independientemente modulada y, en consecuencia, el sistema y método propuesto puede ser utilizado para el multiplexado y demultiplexado de un rango espectral particular (alrededor de ± 100 nm para los cristales biaxiales de $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ utilizados en los experimentos realizados por los presentes inventores). Esta técnica de CR puede ser además combinada con otras técnicas estándar de multiplexado/demultiplexado
25 tales como WDM.

Realizando pequeños cambios o ajustes en la implementación del sistema que se ha utilizado para la prueba experimental descrita, sin salirse del alcance de la invención según está definido en las reivindicaciones adjuntas, se espera poder
30 incrementar aún más la capacidad del canal y extender los resultados a distancias aún mayores. Asimismo, para la mencionada prueba experimental se han considerado y utilizado fuentes de luz clásicas pero nuevas aplicaciones en comunicaciones seguras pueden surgir de la extensión de multiplexado/demultiplexado con CR hacia fuentes de luz cuánticas.

Finalmente, en las Figs. 5a y 5b se ilustra un ejemplo de realización del sistema propuesto por el primer aspecto de la invención, más desarrollado que el ilustrado por la Fig. 1, permitiendo un uso bidireccional del mismo, gracias especialmente a la inclusión de dos sistemas ópticos semitransparentes E1 y E2, tal como dos espejos, que permiten el paso de la luz en un sentido y que la reflejan cuando esta incide en los mismos en sentido contrario.

En la Fig. 5a se ilustra al sistema cuando ha entrado un haz de luz por la izquierda del mismo, según la posición ilustrada, es decir el haz H1a, enfocado por la lente L1, siendo éste demultiplexado por el primer elemento óptico C1 en unos correspondientes sub-haces, o canales ópticos, cambiando la dirección de sus vectores de onda, los cuales son modulados por el modulador M1, todo ello de manera análoga a lo descrito para el ejemplo de realización de la Fig. 1, y tras ello atraviesan al espejo semitransparente E1 y llegan al segundo elemento óptico C2.

Siguiendo con la descripción de la Fig. 5a, en ella puede apreciarse cómo el segundo elemento óptico C2 multiplexa dichos canales ópticos, como ya se ha explicado con referencia a la Fig. 1, y el haz multiplexado HMa, una vez colimado por la lente L2, atraviesa el medio de transmisión y tras él el objetivo o lente L3 y el tercer elemento óptico C3, donde se demultiplexa recuperándose los canales ópticos que lo componen, tras lo cual la luz de estos canales ópticos se refleja en el espejo semitransparente E2 dirigiéndose hacia el fotodetector FD2.

En la Fig. 5b se ilustra al mismo sistema que en la Fig. 5a, pero cuando el haz de luz de entrada es el indicado como H1b, es decir el que entra por la derecha del sistema, utilizándose en este caso como lente de entrada la indicada como L4 y como demultiplexor el cuarto elemento óptico C4, que realiza las mismas funciones que el primer elemento óptico C1.

Tras las demultiplexión de Hb y modulación de sus respectivos canales ópticos mediante el modulador M2, se sigue el mismo proceso explicado con relación a la Fig. 5a, pero en este caso es el tercer elemento óptico C3 el que multiplexa los canales ópticos del haz H1b, tras haber atravesado al espejo semitransparente E2, y el haz multiplexado HMb, una vez colimado por la lente L3, atraviesa el medio de transmisión y tras él el objetivo o lente L2 y llega al segundo elemento óptico C2, donde se demultiplexa recuperándose los canales ópticos que lo componen, tras lo cual la luz de estos canales ópticos se refleja en el espejo semitransparente E1 dirigiéndose hacia el fotodetector FD1.

Es decir que, para el ejemplo de realización ilustrado por las Figs. 5a y 5b, los elementos que un sentido actúan como transmisores, T1 o T2, actúan en un sentido

opuesto como receptores, R1 o R2, proporcionado la citada bidireccionalidad para la transmisión de datos.

Los primer C1, segundo C2, tercer C3 y cuarto C4 elementos ópticos son, en función del ejemplo de realización, cristales biaxiales de refracción cónica, cristales
5 fotónicos o cualquier elemento óptico diseñado para realizar la función explicada.

Un experto en la materia podría introducir cambios y modificaciones en los ejemplos de realización descritos sin salirse del alcance de la invención según está definido en las reivindicaciones adjuntas, pudiendo, por ejemplo, modificarse el sistema bidireccional de las Figs. 5a y 5b, tanto en el número de elementos que lo forman como
10 en su disposición dentro del sistema, manteniendo las citadas características de bidireccionalidad.

REFERENCIAS

- [1] Hemmati, H. "Interplanetary laser communications and precision ranging," *Laser Photonics Rev.* 5, 697–710 (2011).
- [2] Gibson, G., Courtial, J., Padgett, M. J., Vasnetsov, M., Pas'ko, V., Barnett, S. M., and Franke-Arnold, S., "Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum," *Opt. Express* 12, 5448-5456 (2004).
- [3] Slussarenko, S., Karimi, E., Piccirillo, B., Marrucci, L., and Santamato, E., "Efficient generation and control of different-order orbital angular momentum states for communication links," *J. Opt. Soc. Am. A* 28, 61-65 (2011).
- [4] Gatto, A., Tacca, M., Martinelli, P., Boffini, P. and Martinelli, M., "Free-space orbital angular momentum division multiplexing with Bessel beams," *J. Opt.* 13, 064018 (2011).
- [5] Wang, Z., Zhang, N. and Yuan X.-C., "High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication," *Opt. Express* 19, 482-492 (2011).
- [6] Jack, B., Padgett, M. J., and Franke-Arnold, S, "Angular diffraction," *New J. Phys.* 10, 103013 (2008).
- [7] Franke-Arnold, S., Barnett, S. M., Yao, E., Leach, J., Courtial, J., and Padgett, M., "Uncertainty principle for angular position and angular momentum," *New J. Phys.* 6, 103 (2004).
- [8] Jack, B., Aursand, P., Franke-Arnold, S., Ireland, D. G., Leach, J., Barnett, S. M., and Padgett, M. J., "Demonstration of the angular uncertainty principle for single photons," *J. Opt.* 13, 064017 (2011).
- [9] Belskii, A. M., and Khapalyuk, A. P. "Internal conical refraction of bounded light beams in biaxial crystals," *Opt. Spectrosc. (USSR)* 44, 436-439 (1978).
- [10] O'Hara, J. G., "The prediction and discovery of conical refraction by William Rowan Hamilton and Humphrey Lloyd," *Proc. R. Ir. Acad.* 82, 231-257 (1982).
- [11] Berry, M. V. and Jeffrey, M. R., "Conical diffraction: Hamilton's diabolical point at the heart of crystal optics," *Prog. Opt.* 50, 13-50 (2007).

[12] Kalkandjiev, T. and Bursukova, M., "The conical refraction: an experimental introduction," Proc. SPIE 6994, 69940B (2008).

[13] Abdolvand, A., Wilcox, K. G., Kalkandjiev, T. K., and Rafailov, E. U., "Conical refraction Nd:KGd(WO₄)₂ laser," Opt. Express 18, 2753-2759 (2010).

5 [14] Berry, M. V., "Conical diffraction from an N-crystal cascade," J. Opt. 12, 075704 (2010).

[15] Abdolvand, A., "Conical diffraction from a multi-crystal cascade: experimental observations," App. Phys. B 103, 281-283 (2011).

10 [16] Turpin, A., "Cascaded conical refraction", Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 2011, <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/13007>

[17] Loiko, Yu. V., Bursukova, M. A., Kalkandjiev, T. K., Rafailov, E. U. and Mompert, J., "Fermionic transformation rules for spatially filtered light beams in conical refraction," Proc. SPIE 7950, 12 (2011).

15

Reivindicaciones

1.- Sistema de comunicaciones ópticas, del tipo que comprende:

5 - un transmisor (T) configurado para transmitir y codificar información en un haz de luz a través de un medio de transmisión; y

- un receptor (R) dispuesto para recibir dicho haz, tras haber viajado por dicho medio de transmisión, y configurado para decodificar dicha información codificada incluida en el haz de luz ;

estando el sistema **caracterizado** porque:

10 dicho transmisor (T) comprende:

- un demultiplexor formado por al menos un primer elemento óptico (C1) dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, un haz de luz inicial (H1), demultiplexarlo cambiando la dirección de los vectores de onda de al menos dos de los sub-haces que componen dicho haz de luz inicial (H1), y suministrar dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo;

15 - al menos un modulador (M1) dispuesto y configurado para realizar dicha codificación de información modulando en amplitud dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas, cada uno de ellos constituyendo un canal óptico; y

20 - un multiplexor formado por al menos un segundo elemento óptico (C2) dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, la luz de dichos canales ópticos, y suministrar dichos canales ópticos multiplexados hacia dicho medio de transmisión en la forma de un haz de luz multiplexado (HM), por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo,

25 y porque dicho receptor (R) comprende un demultiplexor formado por al menos un tercer elemento óptico (C3) dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, a dicho haz de luz multiplexado (HM), y suministrar, por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo, dichos canales ópticos recuperados tras demultiplexar al haz de luz multiplexado (HM), cambiando la dirección de los vectores de onda de los sub-haces, que son al menos dos, que componen el haz de luz multiplexado (HM).

30 35 2.- Sistema según la reivindicación 1, caracterizado porque:

- dicho primer elemento óptico (C1) es un primer cristal biaxial de refracción cónica, dispuesto y configurado para demultiplexar dicho haz de luz inicial cambiando la dirección de los vectores de onda de los sub-haces que lo componen, suministrando dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas de manera que su proyección en un plano adopta la forma de un anillo de luz, donde los sub-haces con vectores de onda en un mismo plano van a parar a sectores diametralmente opuestos del anillo de luz;

- dicho modulador (M1), que es al menos uno, está dispuesto y configurado para realizar dicha codificación de información modulando en amplitud, en dicho plano de proyección o en otro u otros planos, los sub-haces correspondientes a diferentes sectores de dicho anillo de luz, o canales ópticos;

- y porque dichos segundo (C2) y tercero (C3) elementos ópticos son unos respectivos segundo y tercero cristales biaxiales de refracción cónica.

3.- Sistema según la reivindicación 1 ó 2, caracterizado porque dicho haz de luz inicial (H1) es de tipo Gaussiano.

4.- Sistema según la reivindicación 1, 2 ó 3, caracterizado porque dicho haz de luz multiplexado (HM) es similar a un haz Gaussiano, al menos por lo que se refiere a características de divergencia.

5.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicho medio de transmisión es un medio isotrópico.

6.- Sistema según la reivindicación 5, caracterizado porque dicho medio isotrópico es el espacio libre.

7.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque dicho medio de transmisión es una guía de ondas.

8.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicho transmisor (T) comprende también al menos una primera lente (L1) dispuesta frente al primer extremo del primer elemento óptico (C1) para enfocar el haz de luz inicial (H1) sobre el mismo, y al menos una segunda lente (L2) dispuesta tras el segundo extremo del segundo elemento óptico (C2) para colimar dicho haz de luz multiplexado (HM).

9.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicho receptor (R) comprende al menos un objetivo (L3) dispuesto frente al primer extremo del tercer elemento óptico (C3), para que éste reciba al haz de luz multiplexado (HM) tras atravesar dicho objetivo (L3), y al menos un dispositivo fotodetector (FD) dispuesto frente al segundo extremo del tercer elemento óptico (C3)

para recibir la luz de los canales ópticos y procesar la información contenida en los mismos.

5 10.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque comprende, tras dicho tercer elemento óptico (C3), al menos un grupo óptico que incluye:

- al menos un segundo modulador dispuesto y configurado para codificar información modulando en amplitud dichos canales ópticos recuperados,

10 - al menos un segundo multiplexor formado por al menos un cuarto elemento óptico dispuesto y configurado para multiplexar los canales ópticos codificados por el segundo modulador, y

- al menos un segundo demultiplexor formado por al menos un quinto elemento óptico dispuesto y configurado para demultiplexar al haz de luz multiplexado por el segundo multiplexor.

15 11.- Sistema según la reivindicación 2 o una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 10 cuando dependen de la 2, caracterizado porque dicho modulador (M1), que es al menos uno, comprende al menos una máscara de amplitud angular dispuesta en dicho plano donde se forma el anillo de luz o en otro plano.

20 12.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicho modulador (M1) comprende al menos un modulador de luz espacial.

13.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicho haz de luz inicial (H1) es un haz de luz monocromático.

25 14.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicho modulador (M1) está configurado para modular de manera independiente al menos parte de dichos canales ópticos, mediante modulación espacial o modulación espacial y temporal.

30 15.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicho modulador (M1) está configurado para modular de manera dependiente al menos parte de dichos canales ópticos, mediante modulación espacial o modulación espacial y temporal.

16.- Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque los ejes ópticos de dichos primero (C1) y segundo (C2) elementos ópticos se encuentra alineados entre sí.

35 17.- Sistema según la reivindicación 16 cuando depende de la 2, caracterizado porque dicho segundo cristal biaxial de refracción cónica es substancialmente de iguales dimensiones que el primero.

18.- Sistema según la reivindicación 2 o una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 17 cuando dependen de la 2, caracterizado porque dicho segundo cristal biaxial de refracción cónica se encuentra orientado inversamente con respecto al primero.

19.- Método de comunicaciones ópticas, del tipo que comprende:

5 a) transmitir y codificar información en un haz de luz a través de un medio de transmisión; y

b) recibir dicho haz de luz, tras haber viajado por dicho medio de transmisión, y decodificar dicha información codificada incluida en el haz de luz;

estando el método **caracterizado** porque:

10 dicha etapa a) comprende:

- emitir un haz de luz inicial hacia un primer elemento óptico;

- recibir, mediante dicho primer elemento óptico, dicho haz de luz inicial, demultiplexarlo cambiando la dirección de los vectores de onda de al menos dos de los sub-haces que componen dicho haz de luz inicial, y suministrar dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas;

15

- realizar dicha codificación de información modulando en amplitud dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas, cada uno de ellos constituyendo un canal óptico; y enviar la luz de dichos canales ópticos a un segundo elemento óptico; y

20

- recibir y multiplexar, mediante dicho segundo elemento óptico, la luz de dichos canales ópticos, suministrando dichos canales ópticos multiplexados hacia dicho medio de transmisión en la forma de un haz de luz multiplexado,

25

y porque dicha etapa b) comprende recibir y demultiplexar, mediante un tercer elemento óptico, dicho haz de luz multiplexado, suministrando dichos canales ópticos recuperados tras demultiplexar al haz de luz multiplexado, cambiando la dirección de los vectores de onda de los sub-haces, que son al menos dos, que componen el haz de luz multiplexado.

30

20.- Método según la reivindicación 19, caracterizado porque dichos primer, segundo y tercer elementos ópticos son unos respectivos primer, segundo y tercer cristales biaxiales de refracción cónica, donde cada una de dichas demultiplexaciones de las etapas a) y b) comprende cambiar la dirección de los vectores de onda de los sub-haces que componen el haz de luz inicial, por lo que se refiere a la etapa a), y el haz multiplexado, por lo que se refiere a la etapa b), suministrando dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas de manera que su proyección en un

35

plano adopta la forma de un anillo de luz, donde los sub-haces con vectores de onda en un mismo plano van a parar a sectores diametralmente opuestos del anillo de luz.

21.- Método según la reivindicación 19 ó 20, caracterizado porque está previsto para implementarse utilizando el sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 18.

22.- Método según la reivindicación 19, 20 ó 21, caracterizado porque dicho haz de luz inicial está polarizado lineal o circularmente.

23.- Método según la reivindicación 19, 20 ó 21, caracterizado porque dicho haz de luz inicial está depolarizado.

24.- Transmisor de comunicaciones ópticas, del tipo que está configurado para transmitir y codificar información en un haz de luz a través de un medio de transmisión, estando el transmisor **caracterizado** porque comprende:

- un demultiplexor formado por al menos un primer elemento óptico (C1) dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, un haz de luz inicial (H1), demultiplexarlo cambiando la dirección de los vectores de onda de al menos dos de los sub-haces que componen dicho haz de luz inicial (H1), y suministrar dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo;

- al menos un modulador (M1) dispuesto y configurado para realizar dicha codificación de información modulando en amplitud dichos sub-haces con vectores de onda con direcciones cambiadas, cada uno de ellos constituyendo un canal óptico; y

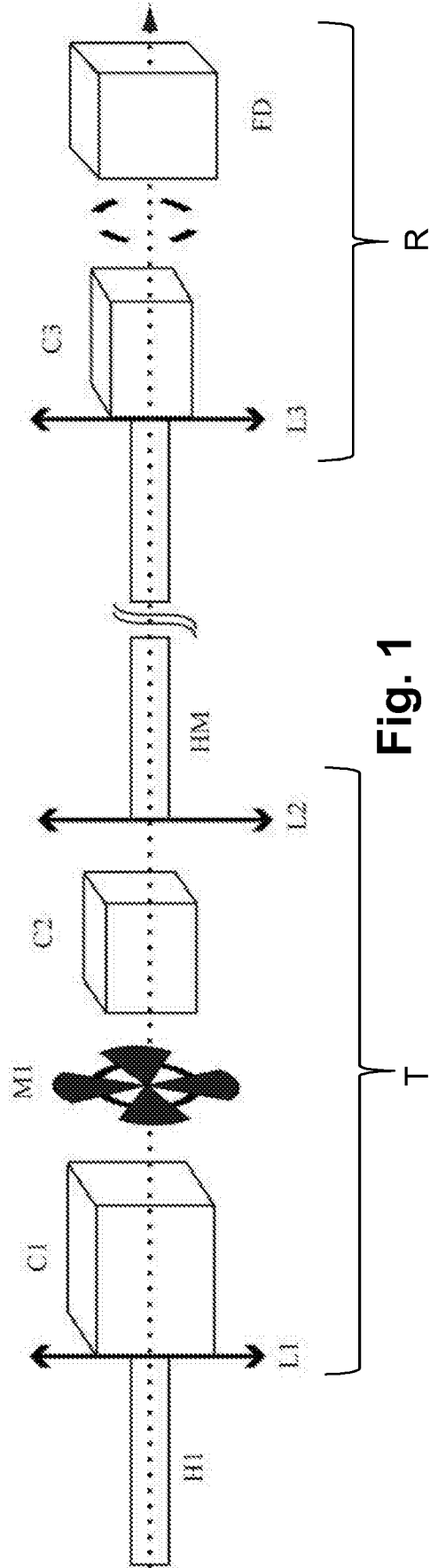
- un multiplexor formado por al menos un segundo elemento óptico (C2) dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, la luz de dichos canales ópticos, y suministrar dichos canales ópticos multiplexados hacia dicho medio de transmisión en la forma de un haz de luz multiplexado (HM), por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo.

25.- Transmisor según la reivindicación 24, caracterizado porque está configurado para hacer las funciones del transmisor (T) del sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 18.

26.- Receptor de comunicaciones ópticas, del tipo que está dispuesto para recibir un haz de luz que incluye información codificada, tras haber viajado por un medio de transmisión, y configurado para decodificar dicha información codificada incluida en el haz de luz, estando el receptor **caracterizado** porque comprende un demultiplexor

5 formado por al menos un elemento óptico (C3) dispuesto y configurado para recibir, por un primer extremo, a un haz de luz (HM) con información codificada en unos canales ópticos correspondientes a unos sectores de luz multiplexados en dicho haz de luz (HM), y suministrar, por un segundo extremo opuesto a dicho primer extremo, dichos
10 canales ópticos recuperados tras demultiplexar el haz de luz multiplexado (HM) cambiando la dirección de los vectores de onda de los sub-haces, que son al menos dos, que componen el haz de luz multiplexado (HM).

27.- Receptor según la reivindicación 26, caracterizado porque está configurado para hacer las funciones del receptor (R) del sistema según una cualquiera de las
10 reivindicaciones 1 a 18.



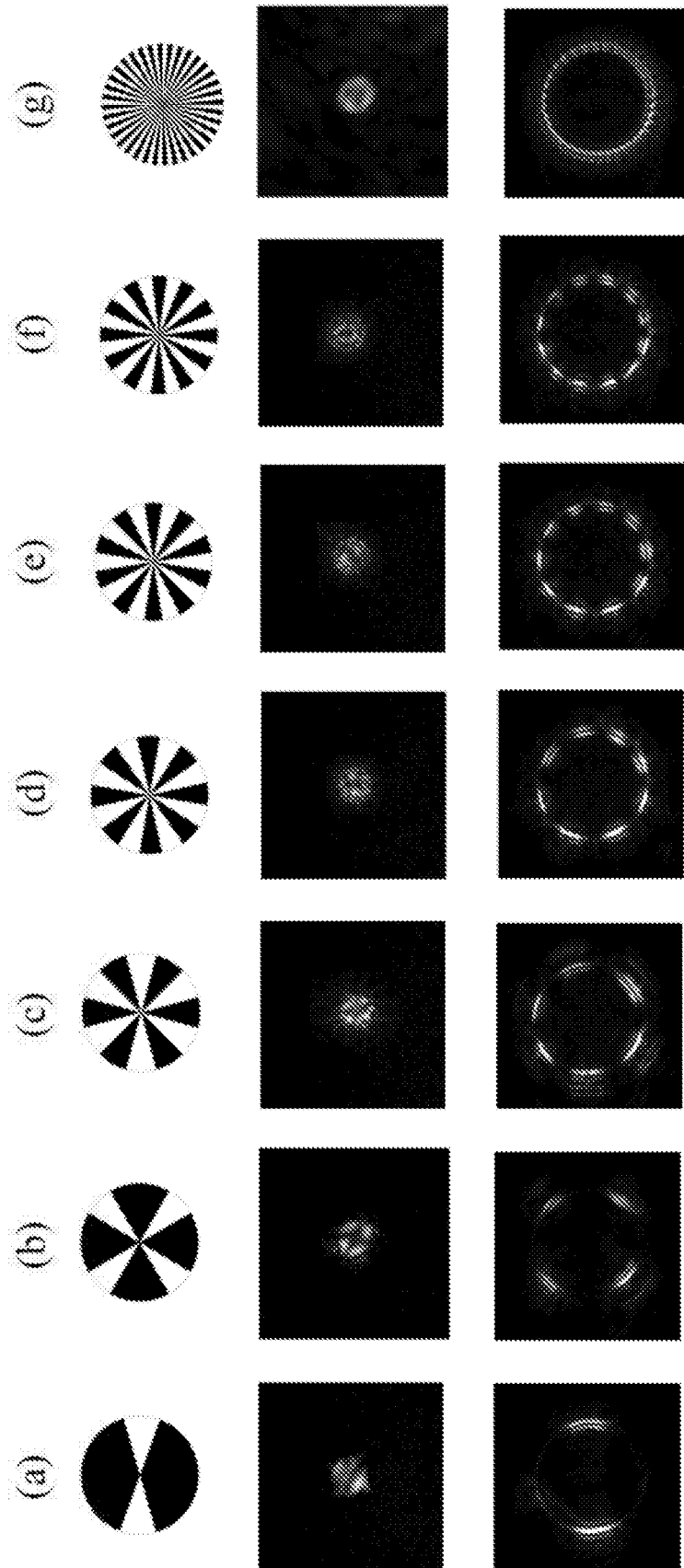
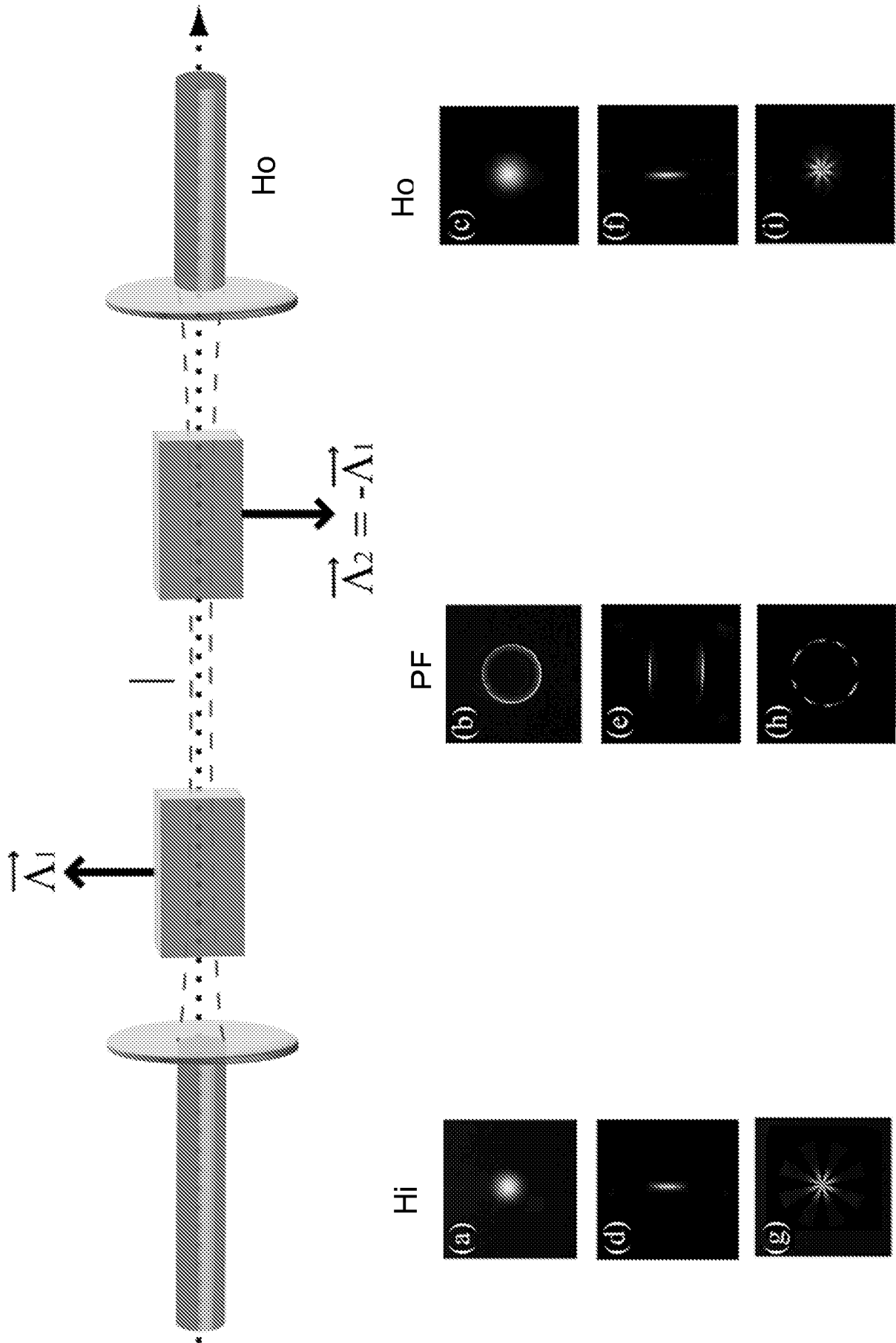


Fig. 2



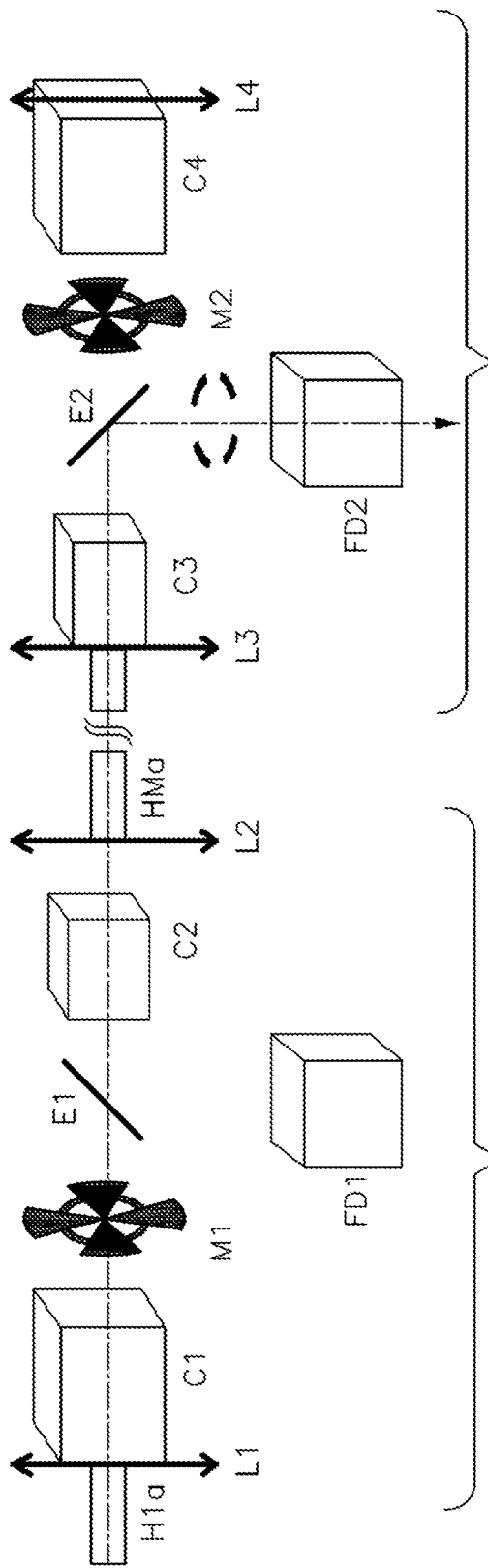


Fig.5a

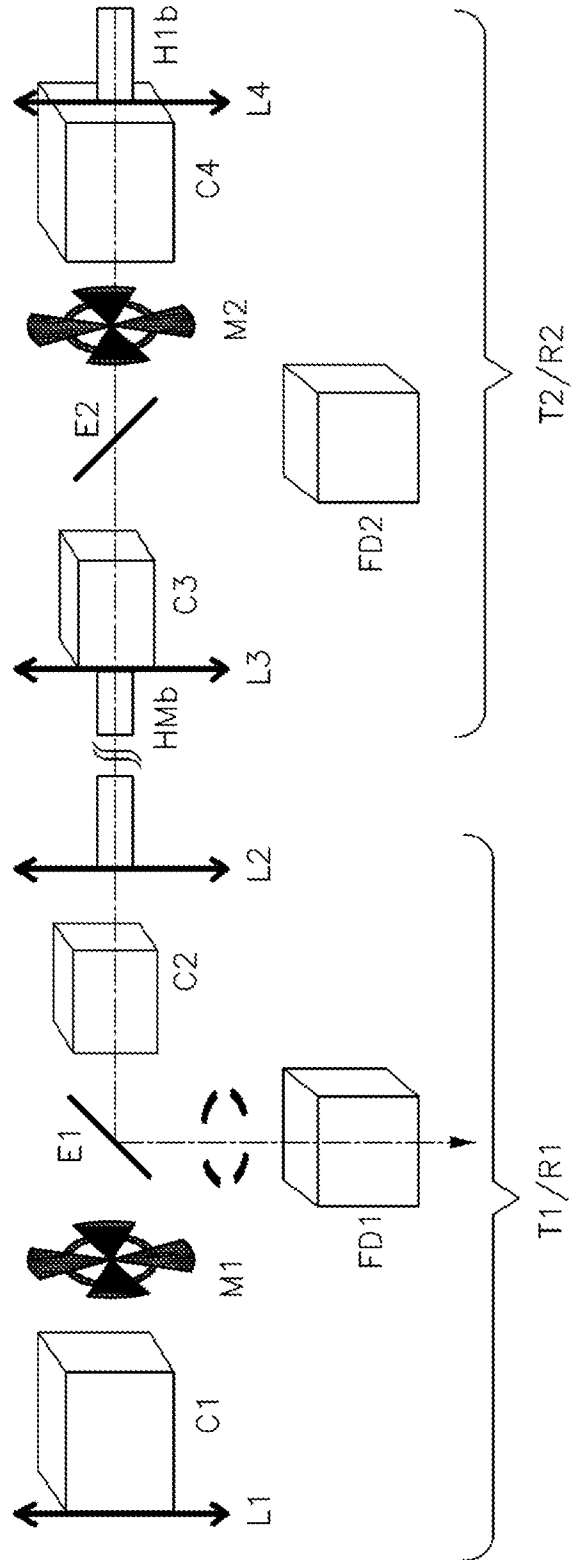


Fig.5b



OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

21 N.º solicitud: 201230105

22 Fecha de presentación de la solicitud: 26.01.2012

32 Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

51 Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	56 Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	LIN, J.; YUAN, X. -C.; TAO, S. & BURGE, R.: "Multiplexing free-space optical signals using superimposed collinear orbital angular momentum states". APPLIED OPTICS, 20 de julio de 2007, Vol. 46, N.º 21, págs. 4680-4685, ISSN 0003-6935.	1-27
A	US 5363221 A (SUTTON, P. et al.) 08.11.1994, todo el documento.	1-27
A	LIN, J.; YUAN, X.-C. & TAO, S.: "Orbital angular momentum (OAM) multiplexing in free-space optical data transfer". En: Free-Space Laser Communications VI, 15 de agosto de 2006, San Diego, USA. Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, USA, 2006, ISSN 0277-786X, Vol. 6304, págs. 630411-1-5.	1-27
A	JP 58202422 A (NIPPON TELEGRAPH & TELEPHONE) 25.11.1983, todo el documento.	1-10,16-21,24-27

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
15.10.2012

Examinador
Ó. González Peñalba

Página
1/4

CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

H04B10/10 (2006.01)

H04B10/12 (2006.01)

G02F1/01 (2006.01)

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

H04B, G02F, H04J

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, INSPEC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 15.10.2012

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones 1-27	SI
	Reivindicaciones	NO
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones 1-27	SI
	Reivindicaciones	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	LIN, J.; YUAN, X. -C.; TAO, S. & BURGE, R.: "Multiplexing free-space optical signals using superimposed collinear orbital angular momentum states". APPLIED OPTICS, 20 de julio de 2007, Vol. 46, N° 21, págs. 4680-4685, ISSN 0003-6935.	

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

Se ha considerado, dentro del límite de tiempo establecido al efecto, que la invención definida en las reivindicaciones 1-27 de la presente Solicitud puede tener novedad y actividad inventiva por no estar comprendida en el estado de la técnica ni poder deducirse de este de un modo evidente por un experto en la materia.

Se han encontrado en el estado de la técnica algunos documentos, como el D01, citado en el Informe sobre el Estado de la Técnica (IET) con la categoría A, que tratan la multiplexación de señales ópticas en el espacio libre en canales múltiples dotados de diferentes estados de momento angular orbital, mediante el uso de una modulación con máscara compleja que incluye tanto la modulación en fase como la modulación en amplitud. Sin embargo, ni en dicho documento ni en otros también citados en el IET se anticipa una disposición de elementos estructurales para tal fin similar en sus detalles (entre ellos, la naturaleza específica del elemento modulador) a la de la presente invención, la cual parece tener, en consecuencia, novedad y actividad inventiva con respecto al estado de la técnica considerado, según los Artículos 6 y 8 de la vigente Ley de Patentes.