



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



① Número de publicación: **2 333 505**

② Número de solicitud: 200801432

⑤ Int. Cl.:  
**G02B 5/20** (2006.01)  
**G02B 5/26** (2006.01)  
**H01S 3/105** (2006.01)

⑫

SOLICITUD DE PATENTE

A1

② Fecha de presentación: **08.05.2008**

④ Fecha de publicación de la solicitud: **22.02.2010**

④ Fecha de publicación del folleto de la solicitud:  
**22.02.2010**

⑦ Solicitante/s: **Universidad Politécnica de Valencia  
CTT-Edificio 6G  
Camino de Vera, s/n  
46022 Valencia, ES  
Institutió Catalana de Recerca i Estudis Avançats**

⑦ Inventor/es: **Espinosa Roselló, Víctor;  
Pérez Arjona, Isabel;  
Redondo Pastor, Francisco Javier;  
Sánchez Morcillo, Víctor José y  
Staliunas, Kestutis**

⑦ Agente: **No consta**

⑤ Título: **Método y cristal fotónico para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética y fuente de radiación electromagnética que comprende dicho cristal fotónico.**

⑤ Resumen:

Método y cristal fotónico para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética y fuente de radiación electromagnética que comprende dicho cristal fotónico.

La invención se refiere en uno de sus aspectos a un método para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética, basado en hacer incidir un haz de radiación electromagnética sobre un cristal fotónico (1) y propagar dicho haz de radiación electromagnética a través del cristal fotónico (1). En un segundo aspecto, se describen las características del cristal fotónico (1) para el filtrado espacial en el exterior del cristal fotónico (1) de un haz de radiación electromagnética, de modo que el periodo espacial longitudinal y el periodo espacial transversal de una cara de dicho cristal fotónico (1) son función de la longitud de onda del haz de radiación electromagnética a filtrar. Por último se describe una fuente de radiación electromagnética (2) que incluye dicho cristal fotónico (1).

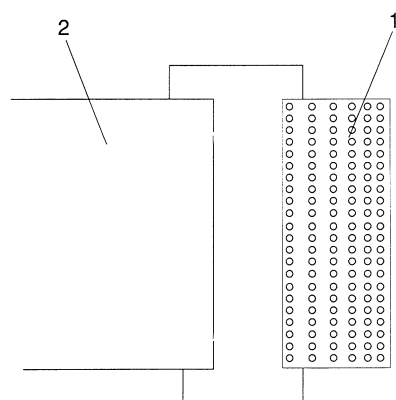


FIG. 3

ES 2 333 505 A1

**DESCRIPCIÓN**

Método y cristal fotónico para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética y fuente de radiación electromagnética que comprende dicho cristal fotónico.

5

**Campo de la invención**

La presente invención pertenece al campo al campo de los filtros espaciales de haces de radiación electromagnética. Por filtrado o limpieza espacial se entiende la eliminación eficiente de las componentes de alta frecuencia de la transformada de Fourier espacial, es decir, el estrechamiento del espectro espacial. Se propone un método y un prototipo para el filtrado espacial, eficaz y apropiado, de haces de radiación electromagnética.

10

**Antecedentes de la invención**

Muchas aplicaciones en óptica requieren el uso de haces limpios, o haces con una buena calidad espacial, esto es, caracterizados por una envolvente suave y un espectro espacial estrecho. Los haces limpios divergen menos en su propagación, pueden ser focalizados más estrechamente y son más robustos frente a la filamentación no lineal que los haces sucios. En el campo del láser, la calidad espacial de un haz suele caracterizarse por el producto de parámetros del haz, BPP, del inglés beam parameter product, que es el producto del semiángulo de divergencia del haz láser y del radio del haz en su punto más estrecho, parámetro denominado también como cintura del haz [A. E. Siegman, "Defining, measuring, and optimizing laser beam quality", Proc. SPIE 1868, 2 (1993)]. El BPP cuantifica la calidad del haz láser, y su bondad para ser focalizado en una zona pequeña. Un haz Gaussiano tiene el mínimo BPP posible,  $\lambda/\pi$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz [A. E. Siegman, "Defining, measuring, and optimizing laser beam quality", Proc. SPIE 1868, 2 (1993)]. La relación entre el BPP de un haz real y un haz ideal Gaussiano a la misma longitud de onda se denomina  $M^2$ . Este parámetro es una medida de la calidad del haz independiente de la longitud de onda, y aumenta a medida que la calidad del haz disminuye. Los láseres con un único modo transversal emiten haces Gaussianos limpios, con  $M^2 \approx 1$ . Sin embargo, la mayoría de haces que emiten los dispositivos ópticos, como los láseres multimodo transversal u osciladores ópticos paramétricos, a menudo no tienen un perfil suave y tienen una calidad espacial pobre, siendo  $M^2 \geq 1$ . La propagación del haz de luz a través de distintos componentes ópticos, tales como amplificadores láser, materiales no lineales, medios dispersivos o termo-ópticos, también reduce la calidad del haz.

15

20

25

30

35

A fin de mejorar la calidad espacial de los haces, éstos se tienen que limpiar o filtrar espacialmente. En la práctica, habitualmente, la limpieza de los haces se lleva a cabo usando un sistema telescópico, consistente en dos lentes focalizadoras dispuestas en una configuración confocal, y un diafragma en el foco. El diafragma permite pasar sólo las componentes de Fourier bajas, y elimina las componentes altas, que se relacionan con inhomogeneidades del haz, con lo que el haz filtrado tiene una calidad espacial mucho más alta. Los inconvenientes del filtrado telescópico son los siguientes:

40

- Un tamaño relativamente grande, más de varios centímetros para la luz visible.
- Sensibilidad al alineamiento, ya que el haz focalizado debe pasar exactamente a través del centro del diafragma.
- Ausencia de lentes focalizadoras eficientes en las frecuencias correspondientes al infrarrojo y ultravioleta.

45

**Descripción de la invención**

En un primer aspecto, la invención se refiere a un método para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética.

50

De acuerdo con la invención, dicho filtrado espacial del haz se llevará a cabo haciendo incidir un haz de radiación electromagnética sobre un cristal fotónico y propagar dicho haz de radiación electromagnética a través del cristal fotónico. Denominaremos como cristal fotónico a lo largo de esta invención aquel material con un índice de refracción que varía periódicamente en el espacio, siendo la periodicidad del material del mismo orden de magnitud que la longitud de onda. Dicha variación podrá existir en una dirección longitudinal del cristal, es decir, según la dirección de propagación del haz, existiendo por tanto un periodo espacial longitudinal, y en una dirección transversal del cristal, es decir, en una dirección perpendicular a la dirección de propagación del haz, existiendo también un periodo espacial transversal.

55

60

El método que propone la invención no se basa en hacer pasar el haz de radiación electromagnética por una sucesión de lentes separadas una distancia apropiada, sino que simplemente es necesario que el haz incida y se propague a través de un cristal fotónico. Con esta solución se evita el tener que disponer de un telescopio, así como el tener que alinear correctamente el haz y el eje de dicho telescopio.

65

El periodo espacial longitudinal y el periodo espacial del cristal fotónico podrá ser función de la longitud de onda del haz de radiación electromagnética a filtrar. De este modo, para una determinada longitud de onda del haz de radiación electromagnética, se deberá diseñar un determinado cristal fotónico, que será distinto a un cristal fotónico

## ES 2 333 505 A1

capaz de filtrar otra longitud de onda. De modo inverso, se puede decir que todo cristal fotónico es capaz de filtrar alguna longitud de onda, relacionada esta longitud de onda con los parámetros del cristal fotónico.

La relación entre los parámetros citados anteriormente se puede expresar del siguiente modo:

$$q_T^2 + (k - q_{||})^2 = \sigma^2 k^2,$$

siendo  $q_T = \frac{2\pi}{l_T}$ ,  $q_{||} = \frac{2\pi}{l_{||}}$  y  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , y siendo  $l_T$  el periodo espacial transversal,  $l_{||}$  el periodo espacial longitudinal,  $\lambda$  la longitud de onda del haz de radiación electromagnética y  $\sigma$  es un parámetro relacionado con la anchura angular espectral de filtrado del haz de radiación electromagnética.

La expresión anterior se deduce a partir del estudio de la relación de dispersión espacial cerca de la condición de propagación no difractiva o de autocolimación, ya que el filtrado espacial óptimo está relacionado con dicha condición como se verá más adelante.

El parámetro  $\sigma$  depende de la modulación del índice de refracción del cristal fotónico,  $m$ , y ésta su vez determina la anchura de la zona plana de la curva isofrecuencial correspondiente a la frecuencia de propagación no difractiva o autocolimación.

El parámetro  $\sigma$  será siempre menor o igual a 1. En el caso de cristales fotónicos con una modulación o variación pequeña del índice de refracción,  $\sigma$  será aproximadamente igual a 1. Sin embargo, para aquellos cristales con una mayor variación del índice de refracción,  $\sigma$  podrá variar entre 1/2 y 1. Su valor concreto, para una configuración determinada, puede obtenerse mediante la solución numérica de las ecuaciones que describen las relaciones de dispersión espacial del cristal, las cuales determinan la propagación de la onda a través del mismo. Nótese que  $\sigma$  no determina la existencia o no de filtrado, sino la magnitud de éste, es decir, es grado de reducción del espectro angular del haz de radiación. Para un valor dado de  $\sigma$  y de la longitud de onda, la ecuación anterior permite obtener los periodos espaciales del cristal necesarios para que éste se comporte como un filtro espacial.

El método descrito podrá ser de aplicación tanto en el caso de que el haz de radiación sea un haz monocromático, como que éste sea un pulso o un tren de pulsos.

En un segundo aspecto, la invención se refiere a un cristal fotónico para el filtrado espacial en el exterior de dicho cristal fotónico de un haz de radiación electromagnética. De este modo, el cristal fotónico será capaz de que una vez que el haz de radiación electromagnética haya incidido y se haya propagado por el cristal fotónico, éste esté filtrado espacialmente y libre de las componentes altas de la transformada de Fourier espacial, fuera del cristal fotónico, que sea lo que en esta invención se denomina como un haz limpio.

Los parámetros del cristal fotónico para lograr este filtrado, es decir, el periodo espacial longitudinal y el periodo espacial transversal de una cara de dicho cristal fotónico, son función de la longitud de onda del haz de radiación electromagnética a filtrar.

El cristal presenta una cara frontal en la que el haz incide y una cara posterior por la que el haz sale ya filtrado del cristal. La relación entre el periodo espacial longitudinal y el periodo espacial transversal y la longitud de onda del haz de radiación electromagnética a filtrar podrá establecerse en la cara frontal o bien en la cara posterior.

La relación entre el periodo espacial longitudinal y el periodo espacial transversal del cristal fotónico y la longitud de onda del haz de radiación electromagnética viene dada por la ecuación siguiente:

$$q_T^2 + (k - q_{||})^2 = \sigma^2 k^2,$$

$q_T = \frac{2\pi}{l_T}$ ,  $q_{||} = \frac{2\pi}{l_{||}}$  y  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , y siendo  $l_T$  el periodo espacial transversal,  $l_{||}$  el periodo espacial longitudinal,  $\lambda$  la longitud de onda del haz de radiación electromagnética y  $\sigma$  función de la anchura angular espectral del haz de radiación electromagnética.

El periodo espacial longitudinal podrá variar en el interior del cristal fotónico a lo largo de la dirección de propagación del haz, en cuyo caso se podrá denominar al cristal como un cristal chirped. Un cristal chirped permite un mejor acoplamiento de la radiación inicial a los modos filtrados y realizar, en un mismo dispositivo, una reflexión muy eficiente en la cara posterior del cristal fotónico, con lo que le elimina más eficientemente la luz desviada o filtrada.

Alternativamente, el periodo espacial longitudinal podrá no variar en el interior del cristal fotónico a lo largo de la dirección de propagación del haz. En este caso se denominará a este cristal como un cristal unchirped.

El filtrado espacial realizado con el cristal fotónico de la invención es más eficiente cuantos más periodos longitudinales tenga el cristal. Sin embargo, un cristal fotónico según la presente invención con veinte periodos longitudinales es capaz de realizar un filtrado satisfactorio. Del mismo modo, también con diez periodos longitudinales se obtienen

## ES 2 333 505 A1

filtrados adecuados. Con este número de periodos longitudinales el grosor del cristal fotónico está limitado a unos pocos milímetros, pudiéndose alcanzar grosores inferiores a un milímetro.

5 El cristal fotónico podrá ser bidimensional, es decir, el índice de refracción variará en la dirección de propagación del haz de radiación electromagnética y en una dirección transversal a dicha dirección de propagación con el fin de realizar un filtrado espacial unidimensional. Alternativamente, el cristal fotónico podrá ser tridimensional, es decir, el índice de refracción variará en la dirección de propagación del haz y en las dos direcciones transversales.

10 La modulación del índice de refracción puede tener distintas simetrías. El filtrado más eficiente en el caso 2D se obtiene para una simetría rómbica de la red. En este caso la luz se propaga a lo largo de la diagonal más larga de la celda rómbica. Otras alternativas posibles en dos dimensiones pueden ser las simetrías cuadrada, triangular o hexagonal. En el caso 3D posibles simetrías son cúbica, fcc o hcp.

15 El método de la invención se basa en hacer pasar el haz de radiación electromagnética a través de una lámina fina de cristal fotónico diseñado para trabajar cerca de la frecuencia del régimen subdifractivo o de autocolimación [Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, Notomi M, Tamamura T, Sato T and Kawakami S, Self-collimating phenomena in photonic crystals, Appl. Phys. Lett. 74, 1212 (1999)]. Las ventajas del método propuesto frente al dispositivo de filtrado telescópico son las siguientes:

- 20 - El tamaño del filtro que se propone es extremadamente pequeño. La lámina de cristal fotónico consistiría en varios periodos longitudinales de la modulación espacial del índice de refracción, alrededor de 10-20, con lo que el grosor del filtro podría ser menor que un milímetro.
- 25 - El dispositivo de filtrado que se puede realizar con el cristal fotónico de la invención no es sensible al alineamiento traslacional del haz con respecto al filtro. Mientras que en los dispositivos de filtrado telescópicos el haz debe estar centrado sobre el eje óptico del dispositivo de filtrado, aquí la posición del haz en la dirección transversal no afecta a las características del haz filtrado.
- 30 - Las dos ventajas básicas del método propuesto permiten construir un sistema de filtrado versátil y muy robusto. El dispositivo de filtrado puede ser construido en forma de un lámina delgada y robusta de material, y su posicionamiento respecto el haz no requiere ni una alta precisión ni un cuidado especial.

35 En un tercer aspecto, la invención se refiere a una fuente de radiación electromagnética que comprende una cavidad y, adicionalmente, un cristal fotónico tal y como se ha descrito anteriormente. La inclusión del cristal fotónico en la fuente de radiación electromagnética, un láser, por ejemplo, permitirá que el haz de radiación emitido por la fuente sea un haz limpio o libre de las componentes de alta frecuencia espacial.

40 El cristal fotónico podrá situarse en al menos dos posibles situaciones. La primera de ellas en el interior de la cavidad de la fuente de radiación y la segunda fuera de dicha cavidad, por el ejemplo en el límite externo de la fuente de radiación.

### Descripción de los dibujos

45 Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

50 Figura 1.- Propagación del haz a través de un material homogéneo. A la izquierda se muestra la curva de isofrecuencia en el espacio del vector de onda, representando la curva de dispersión espacial. A la derecha, la ilustración de la propagación difractiva y de la separación de la parte limpia del haz, correspondiendo al sector A en el diagrama del vector de onda, y la parte modulada del haz, correspondiendo al sector B.

55 Figura 2.- Propagación del haz a través de un material de cristal fotónico a frecuencias próximas a la autocolimación. A la izquierda se observa la típica figura de las líneas isofrecuenciales en el espacio del vector de onda para los parámetros cercanos al punto de difracción nula. A la derecha, la ilustración de la propagación difractiva y de la separación de la parte limpia del haz, correspondiendo al sector A en el diagrama del vector de onda, y la parte modulada del haz, correspondiendo al sector B. En B y C se muestran las componentes (modos de Bloch) no filtradas.

60 Figura 3.- Prototipo para un filtrado eficiente del haz, consistente en una lámina de cristal fotónico diseñada de modo apropiado localizada en el plano de salida de una fuente de luz ruidosa.

Figura 4.- Ejemplos de cristales bidimensionales (a) y tridimensionales (b).

65 Figura 5.- Prototipo para un filtrado eficiente del haz consistente en una lámina de cristal fotónico diseñada de modo apropiado localizada en el interior de un resonador de espejos planos. El cristal está montado monolíticamente en la pared interior de uno de los espejos.

Figura 6.- Prototipo para un filtrado eficiente del haz consistente en una lámina de cristal fotónico diseñada de modo apropiado localizada en el exterior de un espejo curvo de un resonador. El cristal está montado monolíticamente en la pared exterior de uno de los espejos curvos.

## 5 Realización preferente de la invención

A continuación, con referencia a las figuras, se describe un modo de realización preferente del método y cristal fotónico (1) para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética y de una fuente de radiación electromagnética (2) que constituye el objeto de esta invención.

10

El filtrado espacial consiste en una separación de las partes limpias del haz y de sus componentes de ruido, y la consiguiente eliminación de éstas últimas. Si se considera un haz arbitrario descompuesto en ondas planas, su transformada de Fourier espacial, que se realiza también ópticamente en el método telescópico mediante el uso de las lentes, entonces las frecuencias espaciales bajas y altas están relacionadas, respectivamente, con las partes limpias y ruidosas del haz.

15

La separación espacial entre estas partes limpias y ruidosas tiene lugar también en la propagación libre a través de un medio homogéneo. La figura 1 ilustra dicho fenómeno mostrando cómo el haz se ensancha en su propagación y cómo las envolventes de la parte limpia y de la parte espacialmente modulada, es decir, ruidosa, de haz se separan mutuamente la una de la otra.

20

Las direcciones de propagación de las componentes de la onda están dirigidas perpendicularmente a las líneas equifrecuenciales en el espacio  $k$ , espacio del vector de ondas, como se muestra en la figura 1. Estas líneas, que caracterizan las propiedades de dispersión del medio, tienen simetría circular en el caso de tratarse de un medio homogéneo.

25

No obstante, este proceso de separación es muy ineficiente en el caso de propagación libre a través de un material homogéneo. El uso de los telescopios aumenta esta eficiencia ya que la propagación de la lente hasta el punto focal en el telescopio corresponde a una distancia de propagación infinita en propagación libre. En el dispositivo de filtrado convencional las componentes altas del espectro espacial, previamente separadas, se eliminan mediante un diafragma que impide la propagación de las componentes indeseadas.

30

Como es sabido, la dispersión espacial, o equivalentemente, la difracción, de un haz de luz puede ser substancialmente modificada en la propagación a través de medios periódicos como los cristales fotónicos. La figura 2 ilustra las formas típicas de las curvas de dispersión espacial cerca de un punto de particular interés, llamado punto de difracción nula o de autocolimación, que corresponde a una frecuencia determinada del haz. Es típico de la propagación bajo estas condiciones la aparición de segmentos planos o quasi-planos en la curva de dispersión espacial correspondientes a la propagación no difractiva, y la aparición de segmentos fuertemente inclinados en la curva de dispersión espacial, correspondiendo a ángulos de deflexión respecto el eje óptico muy acusados. Las componentes de la onda que caen sobre los segmentos planos, sector A en la figura 2, se propagan sin, o con un muy débil, ensanchamiento difractivo. El resto de componentes, que caen sobre los segmentos fuertemente inclinados, sectores B y C en la figura 2, se desvían fuertemente y se separan muy eficientemente durante la propagación. Ésta es la idea básica del método de filtrado espacial de la invención. En el caso de emplear cristales chirped, que se explicarán a continuación, se previene la aparición de radiación no deseada proveniente de las ramas C.

45

El diseño de una fuente de radiación (2), o de luz, según la presente invención se muestra en la figura 3. En su implementación más sencilla consiste en un cristal fotónico (1), correspondiéndose éste con un material con un índice de refracción que varía periódicamente en el espacio, localizado a la salida de la fuente de luz (2) que desea limpiarse. El cristal fotónico (1) es bidimensional, es decir, el índice varía en la dirección de propagación y en una dirección transversal a la dirección de propagación, para el filtrado espacial unidimensional. Una posible realización de este cristal se muestra en la figura 4a.

50

La figura 4b muestra un cristal fotónico (1) en el que el índice de refracción varía en la dirección de propagación y en las dos direcciones transversales, siendo por tanto un cristal tridimensional, para el filtrado espacial completo, bidimensional.

55

La modulación o distribución espacial del índice de refracción puede tener distintas simetrías. El filtrado más eficiente en el caso 2D se obtiene para una simetría rómbica de la red. En este caso la luz se propaga a lo largo de la diagonal más larga de la celda rómbica. Los períodos espaciales, longitudinal y transversal, del material periódico dependen de la longitud de onda de la onda que se filtra, así como del ángulo deseado del filtrado espacial.

60

En este momento cabe definir dos parámetros que serán usados a lo largo de la presente invención. El primero es la anchura angular espectral del haz de luz incidente. Este parámetro del haz hace referencia a todas las componentes del haz, representadas en las figuras 1 y 2 por flechas. El segundo parámetro es la anchura angular del filtrado, que es una propiedad del cristal y depende de lo ancha que sea la zona plana de la curva isofrecuencial correspondiente. Dicha zona plana de la curva isofrecuencial se denomina plateau y en la figura 2 se corresponde con la zona referenciada como A.

65

## ES 2 333 505 A1

5 En el espacio homogéneo, sin cristal, representado en la figura 1, no hay filtrado porque todas las componentes del haz se propagan sin desviación. En la figura 2 se observa, sin embargo, que el filtrado se lleva a cabo si la anchura angular del filtrado es menor que la anchura espectral del haz. En este caso, las componentes del haz que no coincidan con la anchura angular de filtrado serán desviadas, es decir, filtradas. La anchura angular de filtrado se referenciará en la presente invención como  $\Delta k$ .

10 El hecho de que un haz con una anchura espectral mayor que la anchura angular del filtrado sea filtrado provoca adicionalmente el hecho de que todos los haces de salida del filtro tengan una anchura espectral menor, debido a que las componentes de frecuencias mayores, asociadas a mayores ángulos, han sido desviadas o filtradas. Se puede afirmar que cuanto menor es la anchura del plateau, relacionado con el ancho angular del filtrado, menor es el espectro angular del haz filtrado. Por lo tanto, el ángulo deseado del filtrado espacial mencionado anteriormente, o la anchura espectral del haz filtrado podrá también verse modificada por el proceso y dispositivo de filtrado de la invención.

15 Ambos períodos son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la luz a filtrar. El tamaño longitudinal del dispositivo de filtrado consiste en unos pocos períodos longitudinales del material periódico. La eficiencia del filtrado depende del número de períodos longitudinales. Una calidad bastante buena se puede alcanzar con un cristal de una longitud tan corta como unos 10-20 períodos longitudinales. Las dimensiones transversales del dispositivo deben ser como mínimo del tamaño transversal del haz que se desea limpiar, o bien mayor. Para un tamaño típico de haz, estas dimensiones son inferiores a un centímetro.

20 A fin de obtener un acoplamiento más eficiente en los modos, o componentes de la onda o haz de radiación electromagnética según el teorema de Fourier, fuertemente desviados o filtrados, correspondientes a los segmentos inclinados de las curvas de dispersión, se puede construir un cristal fotónico (1) chirped, esto es, un cristal cuyo período longitudinal varíe suavemente a lo largo del cristal fotónico (1) en la dirección de propagación del haz. El chirping del cristal permite un mejor acoplamiento de la radiación inicial a los modos filtrados y realizar, en el mismo dispositivo, una reflexión muy eficiente en la cara posterior del cristal fotónico (1), con lo que le elimina más eficientemente en el exterior del cristal la luz desviada o filtrada.

25 El método también puede emplearse para filtrar las componentes de alta frecuencia de la luz emitida por fuentes de radiación electromagnética (2), como pueden ser resonadores ópticos y láseres, mejorando la calidad del haz. Como mínimo dos configuraciones diferentes permiten obtener un filtrado eficiente y de calidad. En la primera de ellas, el cristal fotónico (1) es monolíticamente fijado a la cara interna de uno de los espejos que forman la cavidad de la fuente de radiación electromagnética (2). En este caso, un cristal unchirped, periódico a lo largo de la dirección de propagación, crea las condiciones de filtrado óptimas. El uso de cristales chirped no se excluye en esta aplicación del filtrado dentro de cavidades. El prototipo de la configuración intracavidad se muestra en la figura 5.

30 En la segunda configuración se sugiere el uso de un cristal fotónico (1) chirped unido monolíticamente a la parte externa del espejo de salida de la fuente de radiación electromagnética (2). La figura 6 muestra una posible realización con esta configuración. La configuración óptima se obtiene con un cristal chirped, aunque el uso de un cristal unchirped no está descartado.

35 El cristal fotónico (1) de la presente invención queda especificado por tres parámetros: los períodos longitudinal y transversal de la modulación del índice de refracción, o períodos espaciales,  $l_{||}$  y  $l_{\perp}$  respectivamente, así como la profundidad de modulación del índice de refracción,  $m$ , definida como la diferencia entre el valor máximo y mínimo del índice de refracción. Este último parámetro es proporcional a la eficiencia de la red de difracción consistente en un período longitudinal del cristal, es decir, de una línea en el caso bidimensional, o una capa en el caso tridimensional. Se entiende como eficiencia de una red de difracción la capacidad para desviar la luz incidente en los distintos órdenes de difracción.

40 El filtro puede especificarse para una longitud de onda dada  $\lambda$  de la fuente de luz (2) que se desea filtrar, así como para la anchura angular de filtrado que desea filtrarse,  $\Delta k$  definido anteriormente. La anchura angular de filtrado,  $\Delta k$ , es equivalente a la anchura del plateau en la figura 2. Las componentes espaciales del haz de luz que caen dentro del plateau se propagarán en una dirección, mientras que aquellas componentes que el resto son fuertemente desviadas o filtradas.

45 Una especificación aproximada es que los números de onda de la modulación de índice en la dirección transversal,  $q_{\perp} = \frac{2\pi}{l_{\perp}}$ , y en la dirección longitudinal,  $q_{||} = \frac{2\pi}{l_{||}}$  han de cumplir la siguiente condición:  $q_{\perp}^2 + (k - q_{||})^2 = \sigma^2 k^2$ , donde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  es el número de onda de la radiación en el material, y  $\sigma \leq 1$  es un parámetro que depende de la anchura angular del filtrado,  $\Delta k$ . Cristales fotónicos con una variación pequeña del índice de refracción,  $m < 10^{-2}$ , es decir, con unos valores máximos y mínimos del índice de refracción similares, pueden usarse para construir un filtro de banda estrecha, es decir, un filtro que únicamente deja pasar bajas frecuencias. En este caso,  $\sigma \approx 1$  en la condición anterior. Por otra parte, cristales fotónicos con una variación mayor del índice de refracción,  $m > 10^{-2}$ , pueden usarse tanto en la construcción de filtros de banda ancha como estrecha. En este caso, el parámetro  $\sigma$  dependerá de la anchura angular de filtrado  $\Delta k$ , y puede variar entre los valores  $1/2 \leq \sigma \leq 1$ .

## ES 2 333 505 A1

El carácter de la modulación del índice de refracción también puede ser diferente: el índice de refracción puede modularse armónicamente, o de forma escalonada, por ejemplo, mediante agujeros de aire.

5 El grosor de la lámina de cristal fotónico (1) también puede cambiar. Típicamente, cuanto más gruesa es la lámina, más períodos longitudinales contiene el cristal fotónico (1), mayor es la eficiencia en el filtrado espacial.

10 El cálculo de los parámetros para un ejemplo concreto de filtrado espacial es el siguiente, ejemplo 1: un filtro de banda estrecha diseñado para luz verde,  $\lambda=0.532 \mu\text{m}$  en el vacío, período transversal espacial  $l_T=1.25 \mu\text{m}$ , período longitudinal espacial  $l_L=10 \mu\text{m}$ , índice de refracción del material huésped, en este caso vidrio,  $n=1.477$ , la amplitud de modulación del índice de refracción en el cristal considerado, una muestra de vidrio con agujeros de aire de radio  $a=0.2 \mu\text{m}$ , que resulta en una variación del índice de refracción  $m \approx -10^{-2}$ . En este caso, se demuestra que 20 períodos longitudinales del cristal fotónico (1) son suficientes para tener un efecto de filtrado notable. La calidad del filtrado aumenta con el número de capas o períodos. Los parámetros pueden optimizarse para aumentar el efecto de filtrado espacial.

15 La presente invención describe un método y un dispositivo capaz de llevar a cabo un filtrado de las frecuencias altas espaciales de un haz de luz. El filtrado se lleva a cabo empleando cristales fotónicos. La optimización del filtrado, para cada situación particular de operación, puede lograrse ampliando el número de períodos del cristal fotónico o bien modificando ligeramente los períodos longitudinales o transversales espaciales, quedando cualquier modificación dentro del ámbito de protección de la presente invención.

En el cálculo de estos parámetros se ha empleado la técnica de Diferencias Finitas en Dominio Temporal (FDTD).

20 Los parámetros para el caso de filtros espaciales basados en cristales modulados, o cristales chirped, han de especificarse dependiendo de la dirección del chirping. Para un cristal con chirping positivo, en el que período espacial disminuye a lo largo de la dirección de propagación del haz, el período longitudinal al final del cristal fotónico (1) debe coincidir con el especificado para un cristal sin chirping en el ejemplo 1.

30 Los parámetros de un segundo ejemplo concreto, ejemplo 2, de filtro espacial basado en un cristal fotónico (1) con chirping positivo son como en el ejemplo 1, es decir,  $\lambda=0.532 \mu\text{m}$  en el vacío,  $l_T=1.25 \mu\text{m}$ ,  $n=1.477$ ,  $a=0.2 \mu\text{m}$ , 20 períodos longitudinales, salvo en la magnitud de la modulación del período longitudinal, que decrece linealmente desde  $l_L=15 \mu\text{m}$  a la entrada del cristal, hasta  $l_L=10 \mu\text{m}$  a la salida. Este ejemplo concreto de cristal fotónico (1) con chirping positivo permite observar el efecto de filtrado espacial, de forma más eficiente que en el ejemplo 1. Como en el caso anterior, los parámetros pueden optimizarse para aumentar el efecto de filtrado espacial.

35 Para el caso de cristales con chirping negativo, es decir, aquellos en los que el período espacial aumenta a lo largo de la dirección de propagación de la luz, el período longitudinal al comienzo del cristal ha de coincidir con el especificado para un cristal sin chirping como en el ejemplo 1. Los parámetros de un ejemplo concreto de filtro espacial, ejemplo 3, basado en un cristal con chirping son como en el ejemplo 1, es decir,  $\lambda=0.532 \mu\text{m}$  en el vacío,  $l_T=1.25 \mu\text{m}$ ,  $n=1.477$ ,  $a=0.2 \mu\text{m}$ , 20 períodos longitudinales, salvo en la magnitud de la modulación del período longitudinal, que crece linealmente desde  $l_L=10 \mu\text{m}$  a la entrada del cristal, hasta  $l_L=15 \mu\text{m}$  a la salida. Este ejemplo concreto de cristal fotónico (1) con chirping positivo permite observar el efecto de filtrado espacial, de forma más eficiente que en el ejemplo 1. Como en el caso anterior, los parámetros pueden optimizarse para aumentar el efecto de filtrado espacial.

45 El método de filtrado espacial para haces de luz descrito anteriormente puede emplearse para un diseño compacto, robusto y eficiente de filtros espaciales, que pueden tener distintas aplicaciones. Los filtros espaciales podrían aplicarse para:

- 50 - Tecnología láser, para la mejora de la calidad del haz. Los filtros se pueden aplicar en la etapa final del dispositivo láser, a la salida del haz, así como en la etapas intermedias, en el resonador, como filtro espacial intracavidad, o también entre los elementos de procesamiento del haz, tales como amplificadores, compresores del pulso o convertidores de frecuencia. El prototipo es un sistema láser de alta potencia, y/o sintonizable en frecuencia, y/o de pulsos cortos.
- 55 - Láser, y tecnología óptica con el objetivo de construir fuentes de luz compactas que emitan haces limpios y bien focalizados. Los filtros se pueden aplicar tanto como filtros intracavidad como para la radiación emergente.
- 60 - Para la mejora de las fuentes de luz que trabajan en el infrarrojo, infrarrojo lejano, ultravioleta y rayos X, donde los métodos de filtrado actuales, filtrado telescópico, no son eficientes.

A la vista de esta descripción y juego de figuras, el experto en la materia podrá entender que la invención ha sido descrita según una realización preferente de la misma, pero que múltiples variaciones pueden ser introducidas en dicha realización preferente, sin salir del objeto de la invención tal y como ha sido reivindicada.

65

## REIVINDICACIONES

1. Método para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética,

5 **caracterizado** por hacer incidir un haz de radiación electromagnética sobre un cristal fotónico (1) y propagar dicho haz de radiación electromagnética a través del cristal fotónico (1).

10 2. Método para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética según la reivindicación 1, **caracterizado** por que el cristal fotónico (1) tiene un periodo espacial longitudinal y un periodo espacial transversal que son función de la longitud de onda del haz de radiación electromagnética a filtrar.

15 3. Método para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética según la reivindicación 2, **caracterizado** por que la relación entre el periodo espacial longitudinal y el periodo espacial transversal del cristal fotónico (1) y la longitud de onda del haz de radiación electromagnética viene dada por la ecuación

$$q_T^2 + (k - q_{||})^2 = \sigma^2 k^2,$$

20 siendo  $q_T = \frac{2\pi}{l_T}$ ,  $q_{||} = \frac{2\pi}{l_{||}}$  y  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , y siendo  $l_T$  el periodo espacial transversal,  $l_{||}$  el periodo espacial longitudinal,  $\lambda$  la longitud de onda del haz de radiación electromagnética y  $\sigma$  función de la anchura angular espectral del haz de radiación electromagnética.

25 4. Método para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética según cualquiera de las reivindicaciones 1-3, **caracterizado** por que el haz de radiación electromagnética es un haz monocromático.

30 5. Método para el filtrado espacial de un haz de radiación electromagnética según cualquiera de las reivindicaciones 1-3, **caracterizado** por que el haz de radiación electromagnética es un haz pulsado.

35 6. Cristal fotónico (1) para el filtrado espacial en el exterior del cristal fotónico (1) de un haz de radiación electromagnética,

**caracterizado** por que

el periodo espacial longitudinal y el periodo espacial transversal de una cara de dicho cristal fotónico (1) son función de la longitud de onda del haz de radiación electromagnética a filtrar.

40 7. Cristal fotónico (1) para el filtrado espacial en el exterior del cristal fotónico (1) de un haz de radiación electromagnética según la reivindicación 6, **caracterizado** por que la relación entre el periodo espacial longitudinal y el periodo espacial transversal del cristal fotónico (1) y la longitud de onda del haz de radiación electromagnética viene dada por la ecuación

45 
$$q_T^2 + (k - q_{||})^2 = \sigma^2 k^2,$$

50 siendo  $q_T = \frac{2\pi}{l_T}$ ,  $q_{||} = \frac{2\pi}{l_{||}}$  y  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , y siendo  $l_T$  el periodo espacial transversal,  $l_{||}$  el periodo espacial longitudinal, la longitud de onda del haz de radiación electromagnética y  $\sigma$  función de la anchura angular espectral del haz de radiación electromagnética.

55 8. Cristal fotónico (1) para el filtrado espacial en el exterior del cristal fotónico (1) de un haz de radiación electromagnética según cualquiera de las reivindicaciones 6-7, **caracterizado** por que el periodo espacial longitudinal varía en el interior del cristal fotónico (1) a lo largo de la dirección de propagación del haz.

60 9. Cristal fotónico (1) para el filtrado espacial en el exterior del cristal fotónico (1) de un haz de radiación electromagnética según cualquiera de las reivindicaciones 6-7, **caracterizado** por que el periodo espacial longitudinal es constante en el interior del cristal fotónico (1) a lo largo de la dirección de propagación del haz.

10. Cristal fotónico (1) para el filtrado espacial en el exterior del cristal fotónico (1) de un haz de radiación electromagnética según cualquiera de las reivindicaciones 6-9, **caracterizado** por que el cristal fotónico (1) comprende menos de 20 periodos longitudinales.

65 11. Cristal fotónico (1) para el filtrado espacial en el exterior del cristal fotónico (1) de un haz de radiación electromagnética según cualquiera de las reivindicaciones 6-10, **caracterizado** por que el cristal fotónico (1) tiene una simetría de red en dos dimensiones.

## ES 2 333 505 A1

12. Cristal fotónico (1) para el filtrado espacial en el exterior del cristal fotónico (1) de un haz de radiación electromagnética según cualquiera de las reivindicaciones 6-10, **caracterizado** por que el cristal fotónico (1) tiene una simetría de red en tres dimensiones.

5 13. Fuente de radiación electromagnética (2) que comprende una cavidad, **caracterizada** por que comprende un cristal fotónico (1) según cualquiera de las reivindicaciones 6-12.

10 14. Fuente de radiación electromagnética (2) según la reivindicación 13, **caracterizada** por que el cristal fotónico (1) se sitúa en el interior de la cavidad de la fuente de radiación electromagnética (2).

15 15. Fuente de radiación electromagnética (2) según la reivindicación 13, **caracterizada** por que el cristal fotónico (1) se sitúa en el exterior de la cavidad de la fuente de radiación electromagnética (2).

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

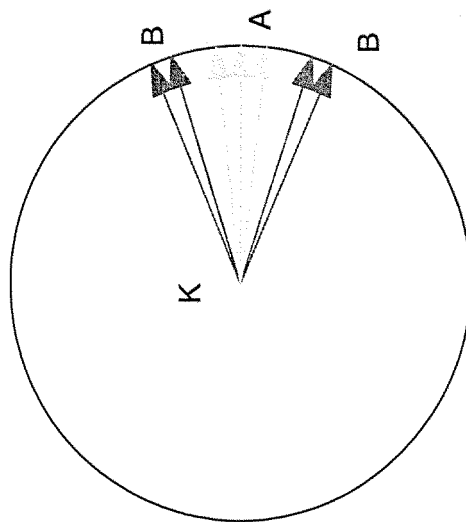
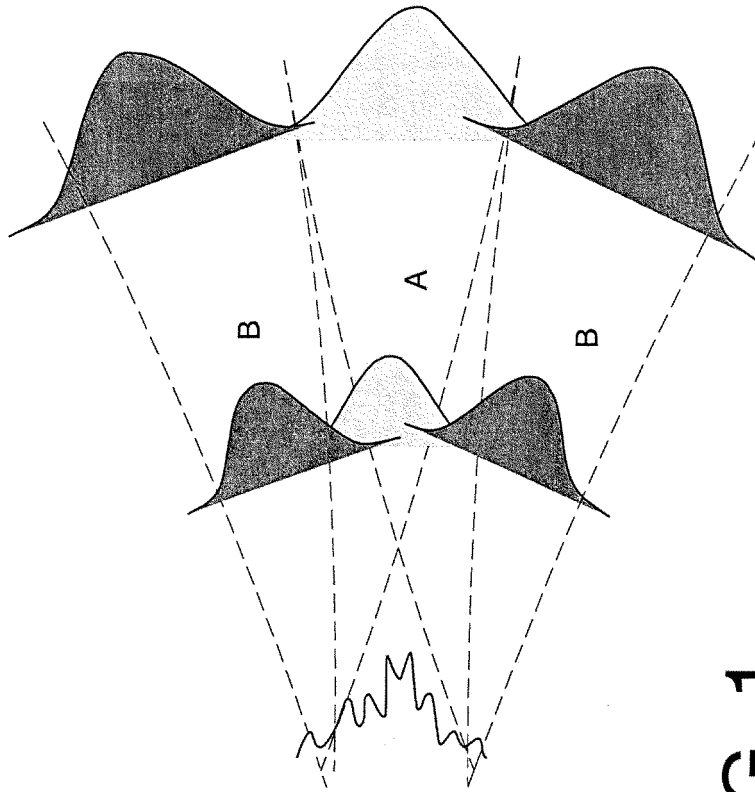


FIG. 1

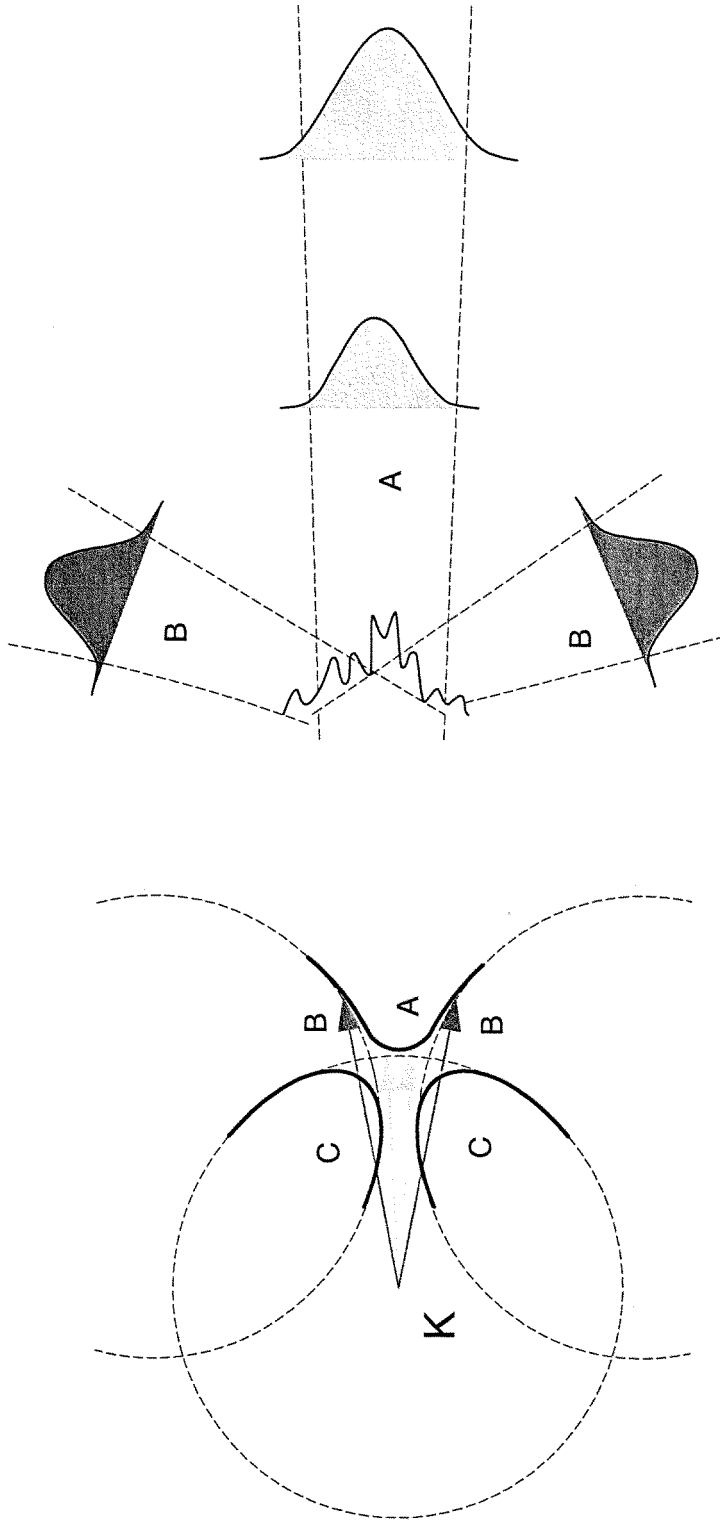


FIG. 2

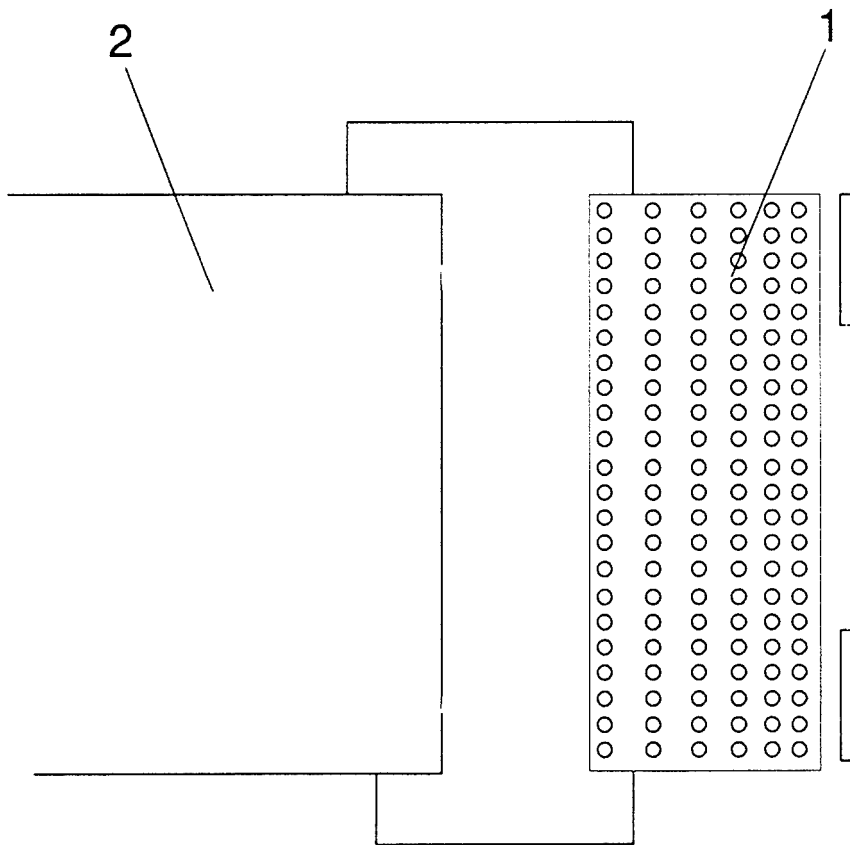


FIG. 3

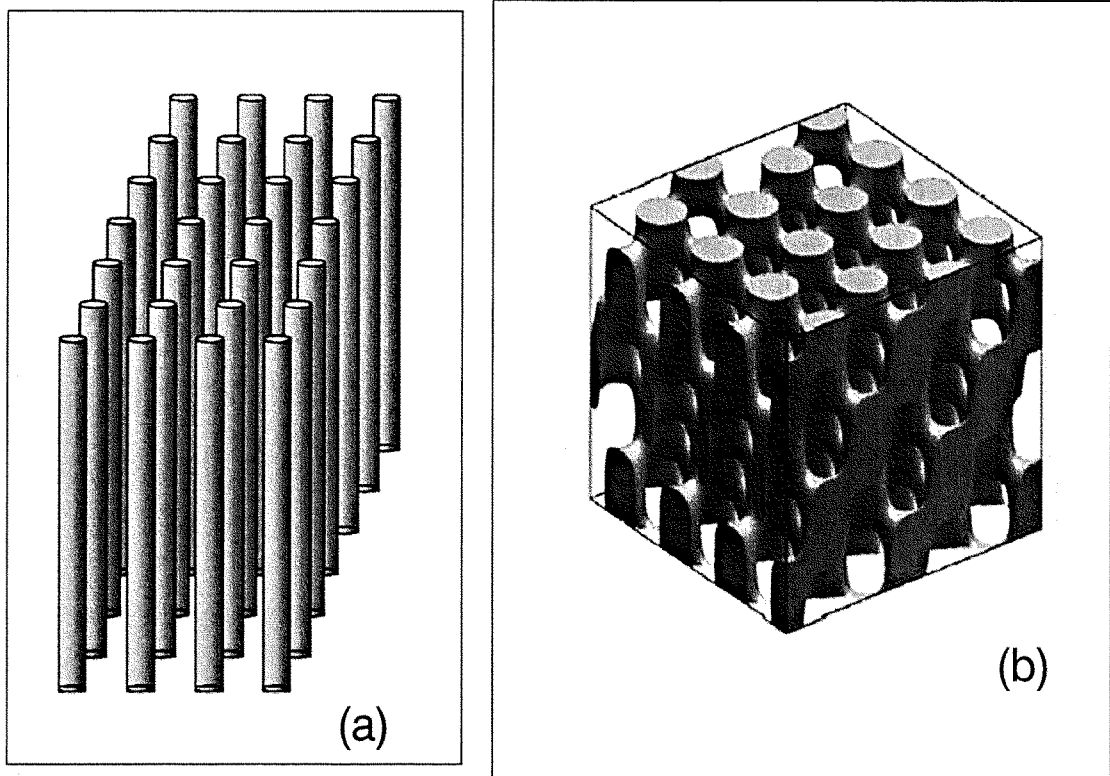


FIG. 4

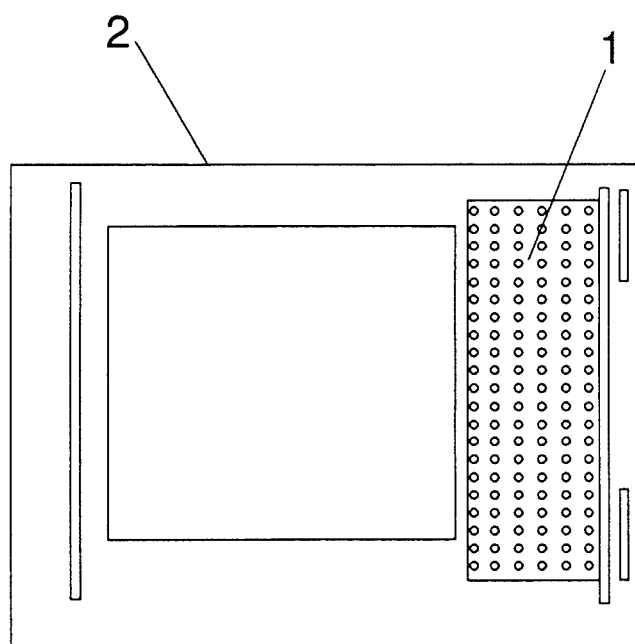


FIG. 5

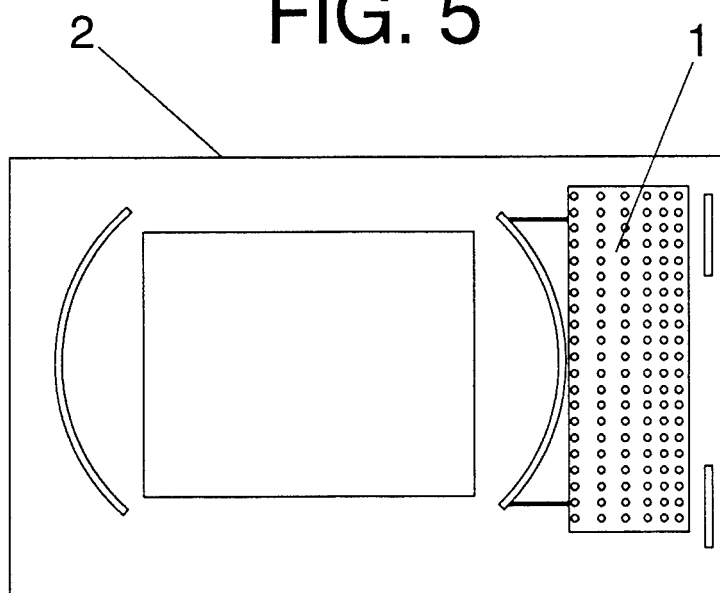


FIG. 6



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 333 505

② N° de solicitud: 200801432

③ Fecha de presentación de la solicitud: **08.05.2008**

④ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ **Int. Cl.:** Ver hoja adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	US 5365541 A (BULLOCK, D.) 15.11.1994, resumen; columna 2, línea 16 - columna 3, línea 4; columna 3, línea 66 - columna 5, línea 15; columna 6, línea 64 - columna 8, línea 64; columna 10, líneas 13-19,39-66; figuras 1-5,10,11,15,16.	1,2,4-6, 8-15
X	TOBIAS, J.M.; AJGAONKAR, M. & GREBEL, H.: "Morphology-depende transmission through photonic crystals". Journal of the Optical Society of America B (Optical Physics), marzo de 2002, Vol. 19, N° 3, páginas 385-389, ISSN 0740-3224.	t 1,4,5
A		2,6,9-12
A	LOIKO, Y.; SERRAT, C.; HERRERO, R. & STALIUNAS, K.: "Quantitative analysis of subdiffractive light propagation in photonic crystals". Optics Communications, 269 (1), 2007, páginas 128-136, ISSN 0030-4018.	1-12
A	STALIUNAS, K.; SERRAT, C.; HERRERO, R; COJOCARU, C. & TRULL, J. "Subdiffractive light pulses in photonic crystals". Physical Review E, 74 ( ), 2006, páginas 1-6, ISSN 1539-3755.	1-12

**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**  
08.02.2010

**Examinador**  
O. González Peñalba

**Página**  
1/4

CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

**G02B 5/20** (2006.01)

**G02B 5/26** (2006.01)

**H01S 3/105** (2006.01)

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

G02B, H01S

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: 08.02.2010

#### Declaración

<b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones	3-5, 7, 8, 14	<b>SÍ</b>
	Reivindicaciones	1, 2, 6, 9-13, 15	<b>NO</b>
<b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones	3, 7	<b>SÍ</b>
	Reivindicaciones	1, 2, 4-6, 8-15	<b>NO</b>

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 ha sido publicada.

#### Consideraciones:

La presente Solicitud se refiere, respectivamente en sus reivindicaciones independientes primera y sexta, a un método de filtrado de un haz de radiación electromagnética que consiste en hacer pasar dicho haz por un cristal fotónico, y al cristal fotónico empleado en dicho método, en el que los períodos espaciales transversal y longitudinal de modulación del índice de refracción según la dirección de propagación del haz guardan una cierta relación, no especificada, con la longitud de onda de la radiación incidente.

Estos método y dispositivo se concretan, respectivamente, en las reivindicaciones dependientes 2-5 y 7-12, referentes a las características geométricas del cristal fotónico, incluyendo una expresión matemática para la relación genérica introducida en las reivindicaciones independientes y otras propiedades geométricas (simetría bi- o tridimensional, variabilidad del período espacial, grosor en número de períodos longitudinales), y a la naturaleza del haz incidente (mono- o policromaticidad, uniformidad en el tiempo o pulsión temporal). Por último, las reivindicaciones 13-15 recogen una aplicación concreta del filtro espacial objeto del dispositivo y método anteriores en una cavidad resonante de emisión de láser.

**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	US 5365541 A	15/11/1994

**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 considera que la invención definida en las reivindicaciones 1, 2, 6, 9-13 y 15 de la presente Solicitud carece de novedad por haberse recogido idénticamente en el estado de la técnica.

En efecto, considerando el documento D01, citado en el Informe sobre el Estado de la Técnica (IET) con la categoría X para dichas reivindicaciones, como el estado de la técnica más próximo al objeto de la presente invención, se describe en él un cristal fotónico que, desde un punto de vista general, es capaz de actuar como filtro espacial para cualquier radiación electromagnética que incida en él (columna 10, líneas 41-43) y cuya estructura de red periódica presenta "... periodos espaciales en dos y tres dimensiones que se escogen [...] para la longitud de onda de interés." (columna 2, líneas 43-49). Queda, así, anticipado idénticamente el contenido de las reivindicaciones 1, 2, 6, 11 y 12. Además, el periodo geométrico de la red cristalina es constante según se desprende de toda la descripción y puede observarse en los dibujos (por ejemplo, en la Figura 10), y el número de periodos de red en la dirección longitudinal es inferior a 20 (en dicha Figura 10 se aprecian 4 periodos), por lo que también carecen de novedad las reivindicaciones 9 y 10 de su Solicitud. Otro tanto cabe decir de la fuente de radiación y la cavidad con cristal fotónico recogidas en las reivindicaciones 13 y 15, también idénticamente anticipadas en D01.

Respecto a las reivindicaciones 4 y 5, la naturaleza del haz en ellas recogida (monocromático en la reivindicación 4 y pulsante en la 5) no se recoge expresamente en D01, pero es evidente que un experto en la materia, disponiendo del cristal fotónico de D01 y conociendo su aplicación como filtro espacial de haces de radiación electromagnética, ensayará en él diversos tipos de haces para encontrar por una mera metodología empírica los que ofrecen un comportamiento más adecuado y ventajoso en cada caso. Ambas reivindicaciones carecen, por tanto, de actividad inventiva respecto a D01. Un razonamiento similar puede aplicarse a la reivindicación 8: los cristales fotónicos de periodo espacial variable son sobradamente conocidos en el estado de la técnica y, aunque no se refieren expresamente en D01, un experto en la materia ensayará de forma evidente su comportamiento en el dispositivo de este documento buscando por métodos empíricos los casos más ventajosos. Y, por último, también la reivindicación 14, por razones análogas, carece de actividad inventiva respecto a dicho documento.