

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 551 519**

51 Int. Cl.:

G02B 5/18 (2006.01)

H01S 3/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.09.2008 E 08804622 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.07.2015 EP 2191306**

54 Título: **Dispositivo óptico dispersivo con cristal fotónico tridimensional**

30 Prioridad:

25.09.2007 FR 0757815

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.11.2015

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (50.0%)**

3, rue Michel-Ange

75016 Paris, FR y

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (50.0%)**

72 Inventor/es:

NEAUPORT, JÉRÔME y

BONOD, NICOLAS

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 551 519 T3

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

DESCRIPCIÓN

Dispositivo óptico dispersivo con cristal fotónico tridimensional

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a un dispositivo óptico dispersivo compuesto particularmente por una red de difracción por reflexión, utilizada en particular para la compresión de impulso de haz láser.

10 **Estado de la técnica anterior**

Las redes de difracción se han desarrollado enormemente en los últimos veinte años, particularmente en relación con los láseres de impulsos cortos, es decir, los láseres cuyo impulso presentan una duración del orden del picosegundo al femtosegundo. El láser Petawatt, por ejemplo, proporciona un impulso de varios kilojulios en varios picosegundos, y presenta así una potencia del orden de 10^{15} vatios.

La obtención de este tipo de impulso presenta una serie de dificultades. No es, en particular, posible para amplificar directamente un impulso sin generar efectos no lineales que deterioran las características temporales y espaciales del haz y pueden dañar los materiales amplificadores. El método llamado de amplificación con deriva de frecuencias permite evitar este inconveniente.

El método de amplificación con deriva de frecuencias consiste inicialmente en estirar temporalmente el impulso de forma que la duración del impulso aumenta y disminuye su potencia. El impulso se amplifica por propagación en un material adecuado, como por ejemplo un cristal de zafiro dopado con titanio ($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$). En definitiva, el impulso se comprime temporalmente de manera que recupera su duración inicial. Los sistemas extensor y compresor utilizados son generalmente redes de difracción por reflexión.

La red de difracción es un dispositivo óptico que presenta una disposición periódica de patrones sobre una superficie. Para que exista la difracción, la longitud de onda del haz incidente debe ser del mismo orden de magnitud que la distancia entre dos rayas, llamada paso de la red. El ángulo del haz difractado r_m en el orden de difracción m se calcula a partir del ángulo del haz incidente i , de la longitud de onda del haz λ , del paso de red a . Los ángulos de los haces incidente y difractado se miden con respecto a la normal n en la superficie de la red de difracción. La ley de difracción de las redes se expresa por: $\text{sen } r_m = \text{sen } i + m\lambda/d$.

El principio de un sistema extensor o compresor se basa en una diferencia de marcha de los trayectos ópticos. La figura 1 muestra el diagrama de un sistema compresor. La señal óptica se refleja en un principio por una hoja semireflectante S y después difractada por una red de dispersión negativa R_1 . La dispersión angular D_a de una red define la dependencia del ángulo de reflexión r_m en función de la longitud de onda λ y se expresa por la relación:

$$D_a = \frac{dr_m}{d\lambda} = \frac{m}{a \cos r_m}$$

Un sistema óptico con dispersión negativa impone a las altas frecuencias de la señal, como se muestra en la figura 1, recorrer un camino óptico más corto que las frecuencias bajas. Los diferentes haces monocromáticos obtenidos por la primera red se reflejan de nuevo por una segunda red R_2 y después por un diedro D antes de recorrer el camino óptico inverso. Por lo tanto, las grandes longitudes de onda λ_R han recorrido un camino óptico más largo que las pequeñas longitudes de onda λ_B . También el impulso de salida presenta una duración más corta. El sistema compresor está dispuesto de manera que el haz encuentra la duración inicial que presentaba en la entrada del sistema extensor.

La reflexión de un haz incidente de impulso corto debe producirse sin dañar los materiales y preservando las características temporales y espaciales de la señal. La reflexión del haz se puede obtener por diversos medios. La aplicación de una capa metálica, como el aluminio, la plata o el oro, se utiliza a menudo, pero está limitada a los impulsos de baja energía. En efecto, el metal presenta una tasa de absorción nada despreciable. La energía absorbida se disipa entonces en forma de calor, y puede dañar gravemente los materiales. La reflexión se puede obtener igualmente por reflexión total interna. Esto impone al haz, más allá de cierto ángulo de incidencia, ser reflejado totalmente. Sin embargo esto requiere que el haz provenga del material más refringente, que no podrá ser el aire. El haz debe llegar en este caso por un material sólido. Ahora bien, durante la propagación en el material, el haz sufre los efectos no lineales que degradan las características espaciales y temporales del impulso de forma inaceptable en el régimen de los impulsos cortos. Por tanto, es necesario que el haz se propague por el aire o en el vacío hacia el medio reflector con el más alto índice de refracción. Los medios reflectores habitualmente utilizados son dieléctricos porque presentan la ventaja de tener un umbral de daño más elevado que el de los metales. A título de ejemplo, el artículo de Perry et al. titulado *High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings* y publicado en 1995 en *Optics Letters*, vol. 20, nº 8, indica que una capa de oro (Au) en una red presenta umbral de daño

experimental de 1 J/cm^2 para un impulso de longitud de onda 1053 nm de duración del orden del nanosegundo y $0,4 \text{ J/cm}^2$ para un impulso de duración inferior al picosegundo. Para un haz de la misma longitud de onda, un material dieléctrico de vidrio de sílice presenta un umbral de daño respectivamente superior a 20 J/cm^2 en régimen nanosegundo y 2 J/cm^2 en régimen picosegundo.

5 El número total de órdenes difractadas propagativas se determina por el paso de la red a , para una longitud de onda y un ángulo de incidencia fijos. El orden 0 corresponde al componente especular no dispersivo. El orden -1 es el orden dispersivo buscado. El número de órdenes propagativas se limita por lo tanto a 2 y toda la energía incidente se debe recoger en el orden dispersivo -1.

10 Se conoce un dispositivo óptico que comprende una red de difracción grabada en un espejo dieléctrico y depositada sobre un sustrato, divulgado en la patente US 5907436. El espejo dieléctrico es una estructura multicapa correspondiente al apilamiento de dos materiales dieléctricos índices de refracción bajo n_L y alto n_H , presentados en la figura 2. Por ejemplo, estos materiales pueden ser respectivamente de SiO_2 y HfO_2 , o incluso SiO_2 y Ta_2O_5 . Los espesores ópticos de las diversas capas deben ser iguales al cuarto de la longitud de onda, u optimizados para garantizar una reflectividad máxima del espejo en la longitud de onda del impulso. En la polarización TE, por lo tanto es necesaria generalmente una veintena de capas para obtener una reflexión cerca del 100%. En definitiva, la red de difracción es grabada en una capa dieléctrica delgada. Este dispositivo óptico presenta una eficiencia de difracción en reflexión del orden del 98% en el orden -1, así como un umbral de daño más elevado que el de los metales, como lo muestra el artículo de Perry et al. citado anteriormente.

20 Un espejo dieléctrico es un caso especial del cristal fotónico. Los cristales fotónicos son materiales que presentan las bandas de frecuencia para las que un haz de la misma frecuencia puede propagarse. Así que sea cual sea el ángulo del haz incidente, el haz se refleja. Estas bandas prohibidas fotónicas permiten obtener una reflectividad máxima.

25 Sin embargo, aparecen un cierto número de dificultades durante el uso de este tipo de dispositivo óptico. Por una parte, un dieléctrico multicapa necesita el uso de dos materiales de propiedades mecánicas diferentes y un gran número de capas necesario para la calidad de la reflexión. La realización del apilamiento de capas es delicada ya que hay que evitar cualquier defecto de espesor de las diferentes capas, defecto que disminuye la eficacia reflectante del espejo dieléctrico. En efecto, las interfaces entre los dos materiales sufren esfuerzos mecánicos, debido a las diferencias en las propiedades físicas y mecánicas, que los debilitan. Estos esfuerzos conducen a la deformación de la superficie de la red de difracción, lo que provoca una degradación del perfil espacial del impulso. Las interfaces favorecen la formación de defectos locales en el que el campo magnético es reforzado fuertemente, que es una fuente potencial de daño.

Además, dada la potencia del haz para difractar, es esencial garantizar un umbral elevado de daño de los materiales.

40 En definitiva, es importante prever un método de fabricación del dispositivo óptico, que sea fácil garantizando las propiedades ópticas óptimas.

Exposición de la invención

45 La presente invención se define por el dispositivo óptico de la reivindicación 1.

Ventajosamente, dicha estructura reflectante es una disposición del tipo red cúbica de caras centradas o red hexagonal.

50 En un primer modo de realización, dicha estructura reflectante es una disposición tridimensional periódica de esferas.

En un segundo modo de realización, dicha estructura reflectante es una matriz que contiene una disposición tridimensional periódica de agujeros esféricos.

55 Ventajosamente, dicha red de difracción y dicha estructura reflectante son de sílice.

Alternativamente, dicha red de difracción y dicha estructura reflectante son de silicio.

60 Breve descripción de los dibujos

Otras características y ventajas de la invención aparecerán a partir de la lectura de las figuras adjuntas entre las que:

65 la figura 1 muestra un diagrama de un sistema compresor conocido de la técnica anterior;

la figura 2 describe un ejemplo de red de difracción dispuesto en un medio dieléctrico multicapa de acuerdo con el estado de la técnica;

la figura 3 muestra un diagrama de bloques en relación con el dispositivo óptico de acuerdo con la invención;

la figura 4 ilustra un modo de realización particular de la invención;

la figura 5 ilustra un segundo modo de realización particular de la invención.

Exposición detallada de modos de realización particulares

El principio de la invención se basa en el uso de una red de difracción de material dieléctrico depositado sobre un medio reflectante que consiste en un cristal fotónico tridimensional del mismo material dieléctrico que la red de difracción.

De acuerdo con la presente invención, el uso de un medio reflectante constituido por un material dieléctrico único permite eliminar los problemas de esfuerzos mecánicos localizados en las interfaces de materiales diferentes.

De acuerdo con la presente invención, el uso de un mismo material dieléctrico tanto para la red de difracción como para el cristal fotónico permite obtener un umbral elevado de daño global del dispositivo, ya que se compone de un solo material. No existe otro material utilizado que disminuya el umbral de daño global del dispositivo óptico.

De acuerdo con la presente invención, el uso de un cristal fotónico tridimensional permite superar las limitaciones inherentes en los cristales fotónicos bidimensionales que se refieren a la fabricación del dispositivo óptico mientras que presente propiedades ópticas óptimas del cristal. En efecto, un cristal bidimensional, tal como un apilamiento de cilindros, presenta una dirección privilegiada correspondiente al eje de los cilindros. Este eje, llamado eje óptico, induce un fenómeno de birrefringencia que se traduce en que el índice de refracción depende de la orientación relativa de la polarización del haz incidente y del eje óptico. Esto conduce por una parte a que las propiedades ópticas del cristal, como los anchos de banda, dependan de la orientación relativa de la polarización del haz incidente y del eje óptico del cristal. Esto conduce por otra parte a una dificultad de fabricación del cristal fotónico debido a la sensibilidad de las propiedades ópticas del cristal con defectos de apilamiento. Cualquier defecto de apilamiento que perturbe el eje óptico del cristal provoca una degradación de las características temporales y espaciales de la señal óptica.

El uso de un cristal fotónico tridimensional permite eliminar totalmente cualquier orientación privilegiada frente a la polarización del haz incidente en el caso de una disposición de cristal cúbico, incluso para reducir en gran medida la influencia de la orientación relativa de la polarización del haz y del eje óptico en el caso de las otras disposiciones que las cúbicas. Además, la fabricación de cristal tridimensional se facilita ya que las propiedades ópticas del cristal son menos sensibles a un defecto de apilamiento que en el caso de un cristal bidimensional, por el hecho de que un cristal tridimensional no presenta eje óptico específico.

Cabe señalar que la red de difracción se distingue del cristal fotónico tridimensional particularmente por el hecho de que presenta una periodicidad sólo en el plano de su superficie, mientras que el cristal presenta una periodicidad en volumen.

Por otro lado, el período de la red de difracción puede ser diferente o sustancialmente igual al del cristal fotónico tridimensional.

Ventajosamente, el material dieléctrico utilizado para la red de difracción y el cristal tridimensional es de sílice. El sílice presenta un umbral de daño elevado que hace su uso particularmente interesante en el cuadro de la amplificación de impulsos.

El material dieléctrico utilizado para la red de difracción y el cristal tridimensional puede igualmente ser de silicio. La elección del material dieléctrico permite adaptarse al campo de la longitud de onda deseada. En el campo de longitud de onda de los láseres de potencia, la elección de un material dieléctrico con umbral de daño elevado es particularmente ventajosa.

A continuación, describiremos a modo de ejemplo un cristal tridimensional en un caso que comprende en un caso una disposición de esferas de sílice y en otro una disposición de agujeros en una matriz de silicio. Por supuesto, estos ejemplos no son limitativos y los materiales descritos pueden ser remplazados por cualquier otro material dieléctrico.

La figura 3 describe un diagrama del dispositivo óptico de acuerdo con la invención. El dispositivo comprende dos elementos, a saber, por una parte, un cristal fotónico tridimensional 1 de sílice, y por otra parte, una red 2 de difracción dispuesta directamente sobre el cristal. El cristal fotónico tridimensional 1 comprende ventajosamente un apilamiento periódico de esferas de sílice o una matriz de silicio que comprende agujeros esféricos de aire o gas. La

disposición de esferas o agujeros esféricos es la de una red de tipo cúbica. Esta disposición no es limitativa y se pueden prever otras disposiciones como la red hexagonal. La malla primitiva de la red del cristal fotónico puede ser una esfera y un agujero esférico, incluso otro motivo capaz de ser apilado, por ejemplo un poliedro. Por otra parte, el dispositivo de acuerdo con la invención comprende una red 2 de difracción dispuesta directamente sobre el cristal fotónico tridimensional 1. La red de difracción es realizada por una capa dieléctrica de sílice de espesor E, en la que está grabada una sucesión periódica de rayas de periodo a y de espesor h. Diferentes motivos son posibles, por ejemplo, sinusoidal, a escala o trapezoidal. Este último motivo se representa en la figura 3. El espesor de la capa dieléctrica no grabada se señala por E = e - h, el ancho de las ranuras se denota por C y la base de los trapezoides tienen ángulos señalados α y β con la horizontal.

Sobre este dispositivo se envía un haz óptico de longitud de onda λ y de ángulo incidente i con respecto a la normal n. Los ángulos se miden por definición con respecto a la normal n. El ángulo del haz difractado en el orden 0 se señala por r_0 y corresponde a la reflexión especular $r_0 = -i$. El ángulo del haz difractado en el orden -1 se señala por r_{-1} .

Los parámetros dimensionales de la red tales como, por ejemplo, la profundidad de la ranura, su anchura, pero también la amplitud y el periodo de la red se pueden optimizar para asegurar una tasa máxima de difracción en el orden de -1. Por lo tanto, se sabe que para asegurar una eficiencia de difracción importante y obtener sólo los niveles 0 y -1 para una longitud de onda dada λ del haz incidente, el paso de la red a debe verificar la relación siguiente:

$$2 < \frac{\lambda}{a} < \frac{2}{3}$$

La figura 4 muestra un modo de disposición cristalino del cristal fotónico tridimensional de acuerdo con la invención, que corresponde al modo cúbico. La figura 4 representa más particularmente la malla primitiva de una red cúbica en la que sólo los tres vectores de periodicidad a_1 , b_1 y c_1 se representan. Los ángulos entre estos tres ejes se señalan α_1 , β_1 y γ_1 . El ángulo α_1 se define entre a_1 y b_1 ; el ángulo β_1 entre b_1 y c_1 y el ángulo γ_1 entre c_1 y a_1 . Por definición de la red cúbica, $a_1=b_1=c_1$ y $\alpha_1 = \beta_1 = \gamma_1 = 90^\circ$. Los nodos de esta malla primitiva pueden corresponder a una esfera o un poliedro de sílice, o un agujero de forma esférica o poliédrica en el seno de una matriz de silicio. Este modo de disposición de acuerdo con la invención corresponde a la familia cristalina cúbica y por lo tanto comprende particularmente la red cúbica centrada y la red cúbica con caras centradas.

La figura 5 muestra un modo de disposición cristalino de cristal fotónico tridimensional de acuerdo con la invención, correspondiente al modo hexagonal. La figura 5 representa más particularmente la malla primitiva de una red hexagonal donde sólo tres vectores de frecuencia a_2 , b_2 , c_2 se representan. Los ángulos entre estos tres ejes se señalan α_2 , β_2 y γ_2 . El ángulo α_2 se define entre a_2 y b_2 ; el ángulo β_2 entre b_2 y c_2 y el ángulo γ_2 entre c_2 y a_2 . Por definición de la red cúbica, $a_2 = b_2$, $\alpha_2 = 120^\circ$ y $\beta_2 = \gamma_2 = 90^\circ$. Los nodos de esta malla primitiva pueden corresponder a una esfera o un poliedro de sílice, o un agujero de forma esférica o poliédrica en el seno de una matriz de silicio. Este modo de disposición de acuerdo con la invención corresponde a la familia cristalina hexagonal, comprende por lo tanto cualquier malla convencional que pertenezca a esta familia.

La fabricación del dispositivo óptico de acuerdo con la invención comprende tres pasos. En primer lugar, el cristal fotónico tridimensional es fabricado de acuerdo con el método descrito en la patente US 6858079 publicada el 22 de febrero de 2005. Este procedimiento difiere del procedimiento clásico de cristalización por sedimentación que no puede evitar la presencia de numerosos defectos de apilamiento. Este proceso permite así dividir por 20 el número de defectos de apilamiento, de acuerdo con el artículo de Vlasov et al. titulado *On-chip natural assembly of silicon photonic bandgap crystals*, publicado en *Nature* el 14 de noviembre de 2001. Se utiliza una suspensión de esferas monodispersas de sílice en un disolvente y luego se sumerge un sustrato en esta suspensión perpendicularmente a la superficie del líquido, para formar un menisco capilar. Por evaporación progresiva del disolvente, las esferas presentes en el menisco sufren una fuerza capilar que los obliga a ser apilados en una disposición que minimiza la energía. Las disposiciones cristalinas resultantes son redes cúbicas con caras centradas o hexagonales. Estas dos disposiciones cristalinas presentan una compacidad entre las más elevadas y por lo tanto minimizan los defectos de apilamiento.

Las esferas monodispersas de sílice se obtienen mediante la adición de tetraetoxisilano en una solución de etanol, agua desionizada e hidróxido de amonio acuoso. El diámetro de las esferas es controlado por la concentración de tetraetoxisilano en la solución.

Por otro lado, para obtener un cristal inverso de silicio, es decir, una matriz compuesta de una disposición periódica de agujeros, se parte de un cristal positivo obtenido como se describió anteriormente. El cristal se llena entonces con silicio amorfo con la ayuda de un horno a baja presión de depósito en fase vapor, solidificado después para obtener una estructura de polisilicio. Las esferas de sílice se disuelven después por ataque químico, por ejemplo con un ácido fluorhídrico acuoso. El sílice es por lo tanto totalmente disuelto y eliminado, lo que permite la obtención de una

matriz de silicio compuesta de una disposición periódica tridimensional de agujeros de aire esféricos.

En una segunda etapa, se deposita una capa de sílice de espesor de varias centenas de nanómetros por ejemplo gracias a un procedimiento sol-gel o un procedimiento de evaporación al vacío de sílice.

5 Se encuentra por ejemplo, una descripción del método sol-gel en la patente FR 2693558 publicada el 14 de enero de 1994. Consiste en el uso de una solución compuesta de una suspensión coloidal de sílice en un disolvente líquido. La solución se deposita sobre el cristal utilizando un cilindro de revestimiento colocado bajo la superficie a tratar y animado de un movimiento de traslación a velocidad constante. El menisco de la solución formado en la periferia del cilindro por humectación asegura el depósito de la capa delgada sobre la superficie del cristal. En definitiva la evaporación del disolvente permite que la solución colocada sobre la superficie del cristal forme la capa delgada deseada. El control de la velocidad permite controlar el espesor de la capa delgada aplicada.

10 El depósito puede realizarse alternativamente mediante un procedimiento de evaporación al vacío de sílice, de una manera conocida per se.

15 En una tercera etapa, la red de difracción está grabada en la capa depositada en la segunda etapa. El grabado puede realizarse de acuerdo con métodos conocidos de holografía o decapado iónico, incluso grabado por diamante. También se puede utilizar un método de depósito a través de una máscara que presenta los motivos periódicos deseados. La red puede ser creada mediante el uso de una máscara que presenta aberturas en el momento deseado y se coloca sobre la capa delgada para ser grabado. El sílice se evapora a través de las aberturas de la máscara. La máscara se retira a continuación por medios químicos, físicos o por plasma para obtener la red.

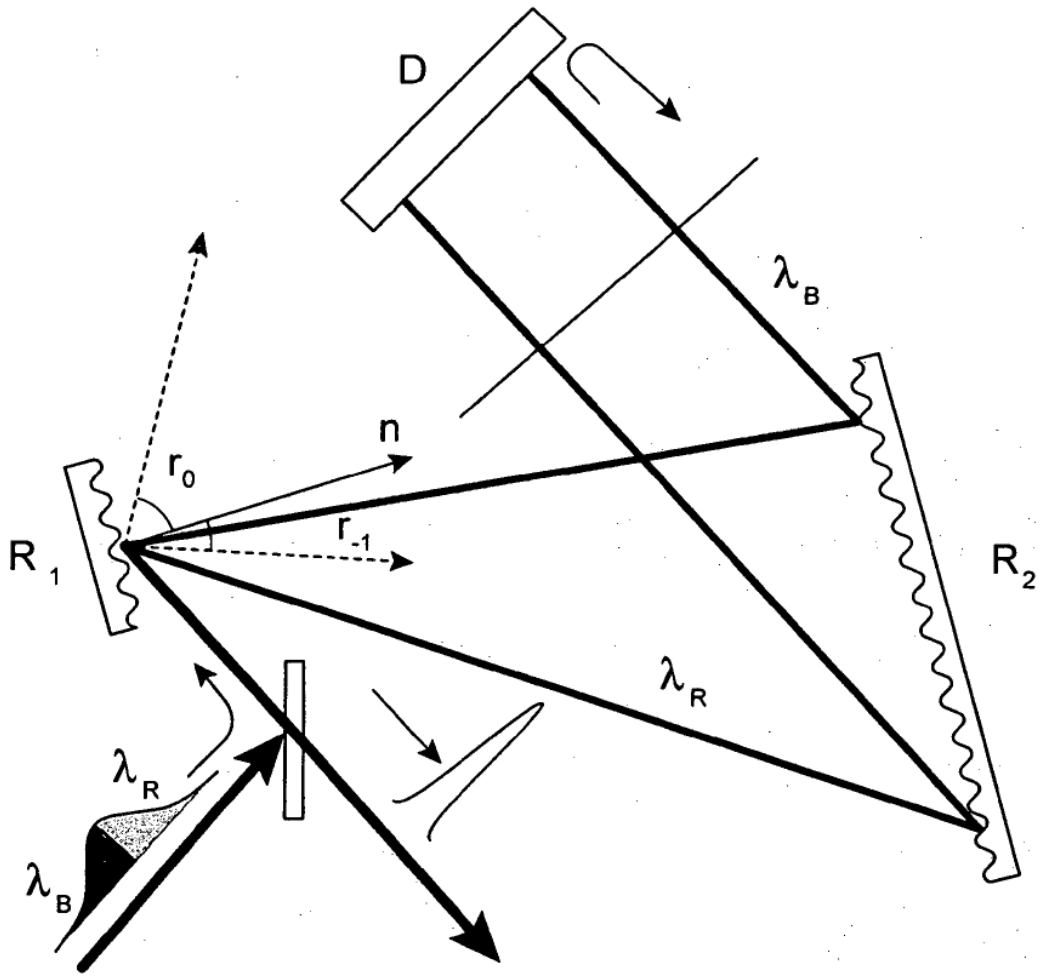
20 Un procedimiento por grabado químico líquido combinado con un procedimiento holográfico, tal como se describe por ejemplo en la patente US 5907436, puede igualmente ser utilizado. Se deposita sobre la capa delgada una capa de máscara para grabar, y luego una capa de un material fotosensible, tal como un fotoresistente. El motivo periódico deseado se imprime por proceso holográfico sobre el fotoresistente. Por medios químicos o de plasma, el fotoresistente así como las partes no protegidas por el fotoresistente de la máscara a grabar se retiran. A continuación, mediante grabado químico líquido, las partes de la capa a grabar no protegidas por la máscara para grabar son grabadas. Finalmente se quita la máscara y la película delgada presenta los patrones de periodicidad deseados.

25 La invención se presenta aquí en el cuadro de un sistema dispersivo de compresión de láser de impulso corto. Es conocido por los expertos en la técnica que se puede utilizar en otras aplicaciones, en particular para frecuencias de espectroscopia o incluso de demultiplexación de frecuencias, por ejemplo en las telecomunicaciones.

REIVINDICACIONES

- 5 1.- Dispositivo óptico, particularmente para la compresión de impulso láser, que comprende una red de difracción por reflexión con una longitud de onda dada, en material dieléctrico dispuesto directamente sobre una estructura reflectante para dicha longitud de onda, caracterizado porque dicha estructura reflectante es un cristal fotónico tridimensional del mismo material dieléctrico que dicha red de difracción.
- 10 2.- Dispositivo óptico de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque dicha estructura reflectante es una disposición de tipo red cúbica con caras centradas o red hexagonal.
- 3.- Dispositivo óptico de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 2, caracterizado porque dicha estructura reflectante es una disposición tridimensional periódica de esferas.
- 15 4.- Dispositivo óptico de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 2, caracterizado porque dicha estructura reflectante es una matriz que contiene una disposición tridimensional periódica de agujeros esféricos.
- 5.- Dispositivo óptico de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque dicha red de difracción y dicha estructura reflectante son de sílice.
- 20 6.- Dispositivo óptico de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque dicha red de difracción y dicha estructura reflectante son de silicio.

Fig.1



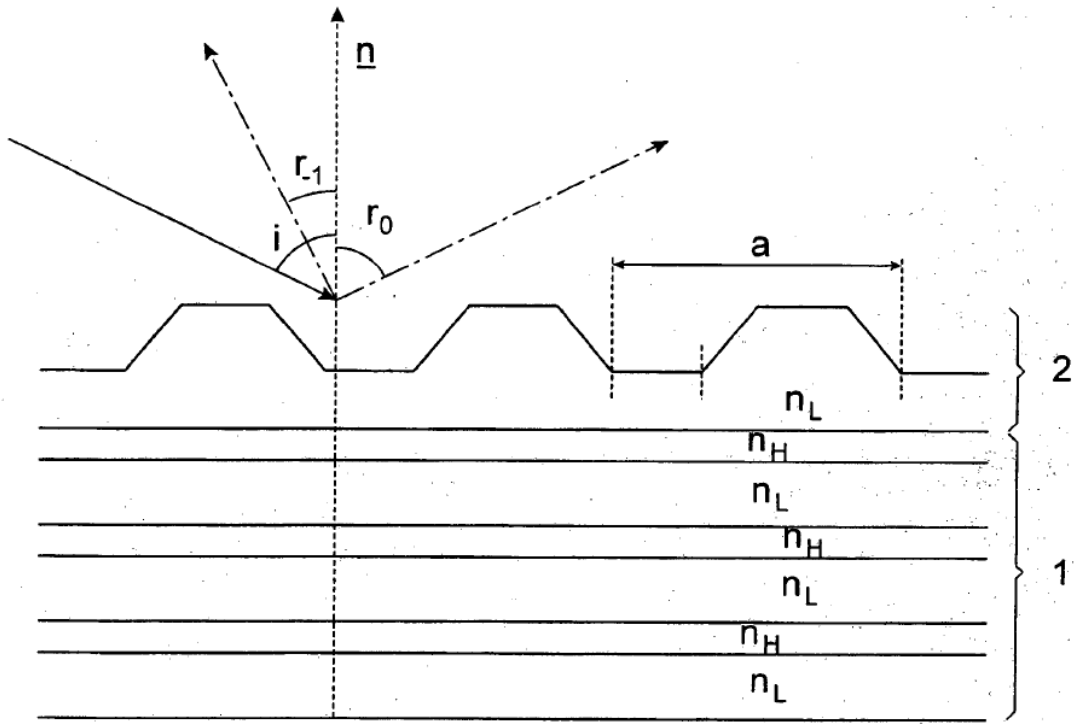


Fig.2

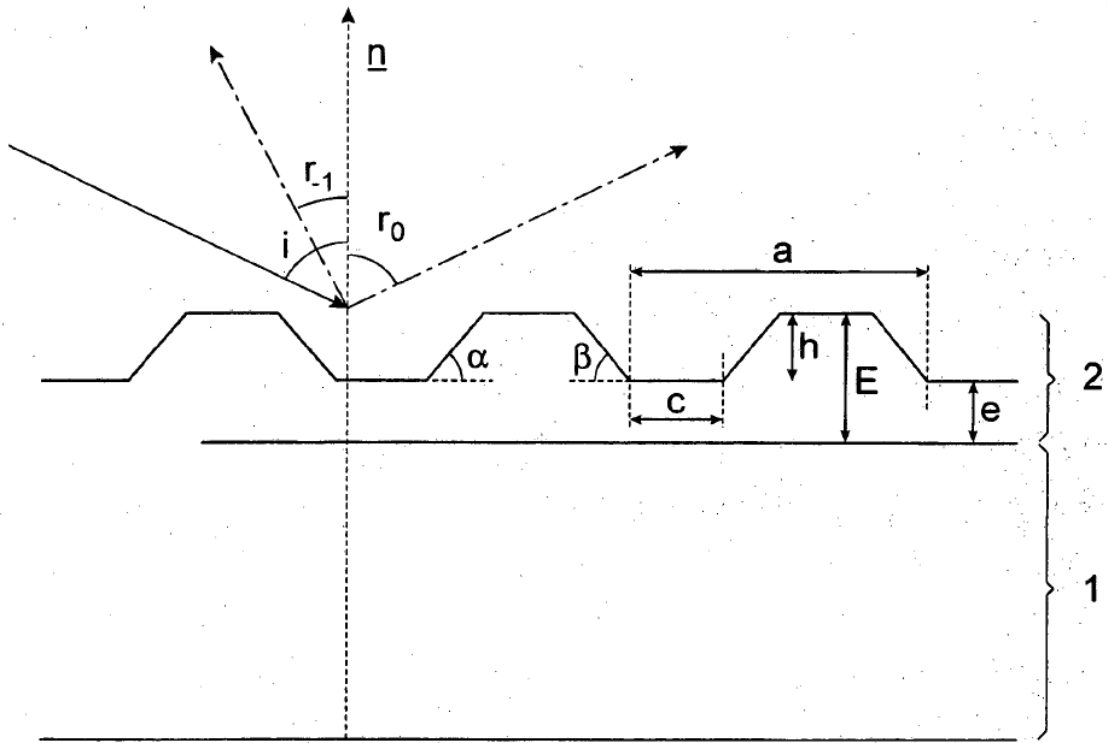


Fig.3

Fig.4

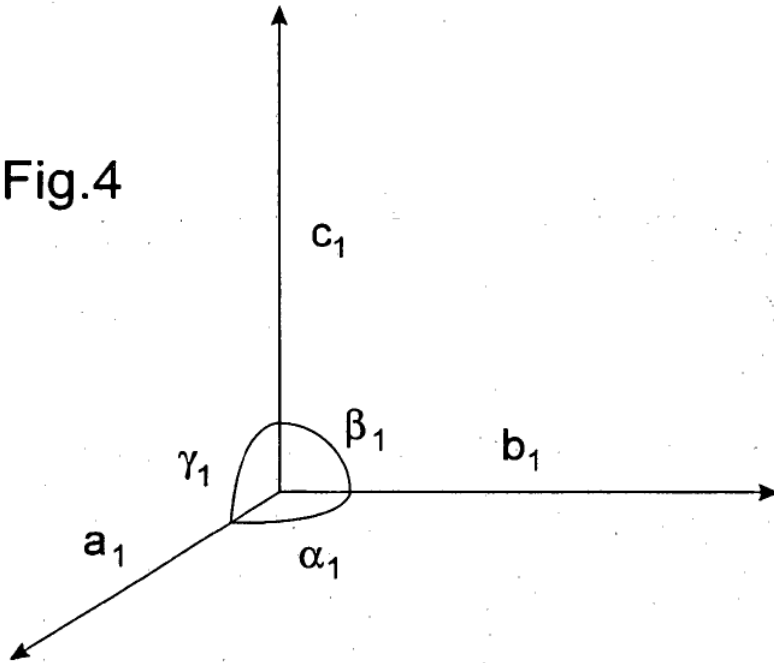


Fig.5

