

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 637 475**

51 Int. Cl.:

B23K 26/06 (2014.01)

B23K 26/067 (2006.01)

B82Y 40/00 (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.03.2011 E 11160615 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.07.2017 EP 2431120**

54 Título: **Método de formación de estructuras periódicas en láminas finas utilizando haces láser interferentes**

30 Prioridad:

16.09.2010 LT 2010069

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

13.10.2017

73 Titular/es:

**VALSTYBINIS MOKSLINIŲ TYRIMŲ INSTITUTAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJŲ MOKSLŲ CENTRAS
(100.0%)**

**Savanorių Avenue 231
02300 Vilnius, LT**

72 Inventor/es:

**RACIUKAITIS, GEDIMINAS;
GEDVILAS, MINDAUGAS y
VOISIAT, BOGDAN**

74 Agente/Representante:

JIMENEZ URIZAR, Maria

ES 2 637 475 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

Método de formación de estructuras periódicas en láminas finas utilizando haces láser interferentes

- 5 **[0001]** La invención se refiere al campo de la tecnología láser y proporciona métodos para la formación directa de estructuras periódicas en películas delgadas, especialmente de metales, y puede utilizarse para fabricar estructuras periódicas (matrices) para dispositivos espectrales y otros dispositivos ópticos, así como blindaje del campo electromagnético.
- 10 **[0002]** El documento JP 62114138 describe un método de tratamiento que utiliza haces láser de interferencia, en el que un fotorresistente es irradiado por un campo de interferencia de cuatro haces, se desarrolla el fotorresistente y la película metálica se graba químicamente a través de los orificios del fotorresistente. Después de aplicar este método a películas, sólo se puede fabricar una matriz de orificios circulares.
- 15 **[0003]** El documento JP 11026344 describe un método para el tratamiento usando los haces láser interferentes, donde una estructura periódica está formada por cuatro haces láser, eligiendo el ángulo de alineación de haz específico y la diferencia de fase entre pares de haces dispuestos opuestos. Dichos haces de interferencia forman una distribución de intensidad de radiación periódica en el material fotorresistente, que está recubierto sobre el material que necesita ser tratado. Después de la exposición, se desarrolla el fotorresistente y se produce una estructura 2D que tiene un periodo que puede ser controlado cambiando la longitud de onda de la radiación láser y el ángulo de convergencia de los haces.
- 20 **[0004]** La desventaja de los métodos conocidos es que la estructura se forma inicialmente en un material fotorresistente y, a continuación, la formación de estructuras periódicas requiere un ataque químico, que es un procedimiento de múltiples etapas y por lo tanto lento, complejo y costoso.
- 25 **[0005]** El documento CN 1603888 describe un método para la formación de estructuras periódicas en las películas metálicas delgadas sobre el sustrato de material transparente, cuando el rayo láser de pulso se divide en dos haces que se centran en la película metálica, formando allí un campo de interferencia, donde a máximos de intensidad del campo de interferencia el metal es ablacionado, y se transfiere a otro sustrato transparente colocado cerca, formando una estructura periódica de islas metálicas condensadas circulares, que corresponde a la disposición de los máximos de intensidad del campo de interferencia. El documento JP 2003025085 describe un método para la formación de estructuras periódicas en películas de material fino por haces láser de interferencia, donde muchos haces (3 o más) están dirigidos a una película delgada para formar un campo de interferencia en la misma. El método proporciona medios para el control de la cantidad de haces, diferencia de fase entre los haces y su amplitud (intensidad). La diferencia de fase se elige entre 0 o $\pi/2$. A los máximos de la intensidad del campo de interferencia, el material se modifica formando estructura periódica.
- 30 **[0006]** Mediante la aplicación de este método a películas, sólo se puede obtener una matriz de orificios circulares, porque este método se limita a hacer un impacto al material en los máximos de distribución de campo de interferencia. La desventaja del método conocido es que puede usarse para formar estructuras periódicas con una única configuración y no hay posibilidad de cambiar la forma de la estructura periódica formada
- 35 **[0007]** Zhao Quan-Zhong et al.: "Formación de orificios dispuestos en lámina de metal y película metálica mediante haces láser de femtosegundo de interferencia múltiple", Física china, Instituto de Publicaciones Físicas, Bristol, GB, vol. 14, no. 6, junio de 2010, pág. 1181-1184 describe un método para formar agujeros dispuestos en una película de metal sobre un sustrato de vidrio por haces láser de femtosegundo de interferencia múltiple. El ajuste de la energía láser, el ángulo de los haces y la longitud focal, entre otros, son parámetros mencionados para cambiar el periodo y la forma de las estructuras fabricadas. Sin embargo, el régimen de trabajo descrito
- 40 **[0007]** Zhao Quan-Zhong et al.: "Formación de orificios dispuestos en lámina de metal y película metálica mediante haces láser de femtosegundo de interferencia múltiple", Física china, Instituto de Publicaciones Físicas, Bristol, GB, vol. 14, no. 6, junio de 2010, pág. 1181-1184 describe un método para formar agujeros dispuestos en una película de metal sobre un sustrato de vidrio por haces láser de femtosegundo de interferencia múltiple. El ajuste de la energía láser, el ángulo de los haces y la longitud focal, entre otros, son parámetros mencionados para cambiar el periodo y la forma de las estructuras fabricadas. Sin embargo, el régimen de trabajo descrito
- 45 **[0007]** Zhao Quan-Zhong et al.: "Formación de orificios dispuestos en lámina de metal y película metálica mediante haces láser de femtosegundo de interferencia múltiple", Física china, Instituto de Publicaciones Físicas, Bristol, GB, vol. 14, no. 6, junio de 2010, pág. 1181-1184 describe un método para formar agujeros dispuestos en una película de metal sobre un sustrato de vidrio por haces láser de femtosegundo de interferencia múltiple. El ajuste de la energía láser, el ángulo de los haces y la longitud focal, entre otros, son parámetros mencionados para cambiar el periodo y la forma de las estructuras fabricadas. Sin embargo, el régimen de trabajo descrito
- 50 **[0007]** Zhao Quan-Zhong et al.: "Formación de orificios dispuestos en lámina de metal y película metálica mediante haces láser de femtosegundo de interferencia múltiple", Física china, Instituto de Publicaciones Físicas, Bristol, GB, vol. 14, no. 6, junio de 2010, pág. 1181-1184 describe un método para formar agujeros dispuestos en una película de metal sobre un sustrato de vidrio por haces láser de femtosegundo de interferencia múltiple. El ajuste de la energía láser, el ángulo de los haces y la longitud focal, entre otros, son parámetros mencionados para cambiar el periodo y la forma de las estructuras fabricadas. Sin embargo, el régimen de trabajo descrito
- 55 **[0008]** El documento DE102006023940 describe la nanoestructuración de un sustrato metálico o semiconductor por ablación láser directa. La superficie del sustrato se recubre con una capa sacrificial de polímero transparente endurecido. Los haces láser pulsados de femtosegundos se hacen interferir para irradiar la superficie del sustrato con un patrón de intensidad láser espacialmente distribuido. La densidad de energía en la región de alta intensidad del patrón de intensidad está ligeramente por encima del umbral para destruir la superficie del sustrato. Variando el patrón de irradiación y la fluencia del láser, se forman patrones inusuales.

5 **[0009]** Por consiguiente, existe la necesidad de formar estructuras periódicas directamente sin utilizar películas intermedias (fotorresistente) y sin utilizar operaciones adicionales (recubrimiento del fotorresistente, desarrollo y grabado químico del mismo) y controlar la formación de estructuras periódicas con diferentes patrones, y además
 10 extender el campo de aplicación de las estructuras obtenidas mediante este método. Este objetivo se consigue proporcionando un método como se define en las reivindicaciones adjuntas. Este método no requiere un proceso complejo para obtener directamente imágenes diferentes de las estructuras formadas, es decir, la naturaleza umbral de la ablación de película crea las condiciones para controlar la imagen formada de las estructuras periódicas (el diseño, la forma) cambiando la intensidad total de los haces láser de interferencia y permite extender el campo de aplicación para las estructuras obtenidas utilizando este método

[0010] De acuerdo con la presente invención, se proporciona una diferencia de fase $\Delta\phi$ entre los haces láser de interferencia

15 **[0011]** Esto proporciona un control adicional sobre la distribución de la intensidad del láser interferente y permite obtener una mayor diversidad de estructuras periódicas formadas

[0012] Preferiblemente, tres o cuatro, o seis haces láser interferentes, dispuestos simétricamente con respecto a la normal a la superficie de la película, están dirigidas a dicha película.

20 **[0013]** Mediante la elección del número de haces 3 o 6 es posible obtener estructuras con simetría hexagonal, mientras que utilizando 4 haces es posible obtener estructuras con simetría cuadrada o rectangular

25 **[0014]** Otra implementación beneficiosa del método propuesto es que la imagen de distribución de interferencia puede modificarse adicionalmente dirigiendo un rayo láser central adicional dentro de dicha película, en la dirección del eje de simetría de dichos haces láser interferentes

30 **[0015]** Esto da un control adicional sobre la distribución de la intensidad del láser interferente, dependiendo de la posición de la película con respecto al punto de intersección de los haces, y permite obtener una mayor diversidad de estructuras periódicas formadas.

[0016] Además, la imagen de la distribución de interferencia se modifica adicionalmente eligiendo la distancia Δz entre dicha película y el punto de intersección del rayo dentro de ella a lo largo de la dirección de propagación z del rayo central.

35 **[0017]** El material de película delgada es un metal tal como cromo, aluminio, plata, cobre, oro, mientras que el sustrato es un material transparente, por ejemplo, vidrio.

40 **[0018]** En este caso, puede usarse en la fabricación de filtros espectrales, para rangos espectrales visibles, infrarrojos y terahercios, dependiendo del periodo de la estructura y de la forma y tamaño de los elementos estructurales. Otro campo de aplicación es la fabricación de películas delgadas mediante la formación de recubrimientos selectivos de frecuencia para rangos espectrales de radio u ópticos.

45 **[0019]** La película delgada es un material eléctricamente conductor, tal como óxido de indio-estaño, mientras que el sustrato es un material dieléctrico tal como vidrio o polímero. En este caso, el procedimiento se puede usar formando contactos electrónicos de película delgada, por ejemplo, en la fabricación de pantallas LCD

50 **[0020]** Otra realización de método beneficioso es que el sustrato está recubierto de vidrio con una fina película de cromo, con cuatro haces láser de interferencia dirigidos hacia ella, donde dependiendo de la forma deseada de la estructura periódica, la diferencia de fase $\Delta\phi$ entre los pares de haces opuestos se selecciona entre cero y $\pi/2$, mientras que la intensidad del láser en la intensidad formada I_0 , los máximos de distribución se seleccionan de tal manera que el umbral de intensidad de evaporación I_{th} de dicha película debe ser desde el 50% hasta aproximadamente 1,5 %, Intensidad I_0 , en los máximos de distribución de interferencia formada.

55 **[0021]** La invención se explica con más detalle con la ayuda de figuras, en las que:

Fig. 1 - El esquema óptico del dispositivo para la formación de estructuras periódicas, para la implementación del método propuesto.

5 Fig. 2 - El esquema de formación de imagen de interferencia, sin el rayo central (a) y cuando el rayo central es presente 0 (b).

Fig. 3 - El esquema de la disposición simétrica de los cuatro haces láser interferentes

10 Fig. 4 - Imágenes de las estructuras periódicas obtenidas formando con los cuatro haces láser interferentes dispuestos simétricamente según la Fig. 3, mediante el cambio del nivel global de intensidad y / o la fase entre los haces, donde se muestra:

15 A) la imagen "estándar" con los orificios circulares sobre una película metálica sobre el sustrato de vidrio;

20 B) la imagen de los rombos dispuestos en un patrón de tipo "ajedrez", obtenido cuando la diferencia de fase entre los haces pares (2, 4) y los impares (1, 3) es igual a $\Delta\phi = \pi/2$ y la intensidad del láser en los máximos de la distribución de interferencias cumplen la condición

$$I_{th} = I_0 \times 50\%;$$

25 C) la imagen de los rombos dispuestos en un patrón similar al "tablero de ajedrez", obtenido experimentalmente en una película de cromo de 100 nm de espesor sobre el vidrio, cuando las condiciones de la Fig. 4b se cumplen;

30 D) la imagen en forma de estructura segmentada en forma de red, obtenida cuando la diferencia de fase entre los haces pares (2, 4) y los impares (1, 3) es igual a $\Delta\phi = \pi/4$ y $I_{th} = I_0 \times 14\%$

35 E) la imagen en forma de estructura en forma de red, obtenida experimentalmente en una película de cromo de 100 nm de espesor sobre el sustrato de vidrio, cuando la diferencia de fase entre los haces pares (2, 4) y los impares (1, 3) $\Delta\phi$ cambia gradualmente de izquierda a derecha y en el lado derecho las condiciones de la fig. 4d se cumplen;

F) la imagen en forma de red simple, obtenida cuando la diferencia de fase entre los haces pares (2, 4) y los impares (1, 3) es igual a $\Delta\phi = \pi/8$ y $I_{th} = I_0 \times 4\%$.

Fig. 5 - El esquema de la disposición simétrica de los tres haces láser interferentes

40 Fig. 6 - Imágenes de las estructuras periódicas obtenidas formando con los tres haces láser interferentes dispuestos simétricamente de acuerdo con la Fig. 5, cuando $\Delta\phi = 0$ y $I_{th} = I_0 \times 11\%$ (a) y $I_{th} = I_0 \times 50\%$ (b).

45 Fig. 7 - El esquema de la disposición simétrica de los seis haces láser interferentes

Fig. 8 - Imágenes de las estructuras periódicas obtenidas formando con los seis haces láser interferentes dispuestos simétricamente de acuerdo con la Fig. 7, cuando $\Delta\phi = 0$ y $I_{th} = I_0 \times 6\%$ (a) y $I_{th} = I_0 \times 11\%$ (b)

50 Fig. 9 - Esquema de disposición de los tres haces dispuestos simétricamente y del rayo central

Fig. 10 - Imágenes de las estructuras periódicas obtenidas formando con los tres haces láser interferentes dispuestos simétricamente y el rayo central de acuerdo con la Fig. 9, cuando $\Delta\phi = 0$, $\Delta z = 0$ y $I_{th} = I_0 \times 6\%$ (a) y $I_{th} = I_0 \times 11\%$ (b).

55 Fig. 11 - Esquema de disposición de los seis haces dispuestos simétricamente y del rayo central

Fig. 12 - Imágenes de las estructuras periódicas obtenidas formando con los seis haces láser interferentes dispuestos simétricamente y el rayo central de acuerdo con la Fig. 11, cuando $\Delta\phi = 0$, $\Delta z = 0$ y $I_{th} = I_0 \times 1,5\%$ (a) y $I_{th} = I_0 \times 7\%$ (b).

Fig. 13- Esquema de disposición de los cuatro haces dispuestos simétricamente y del rayo central.

Fig. 14 - Imágenes de las estructuras periódicas obtenidas formando con los cuatro haces láser interferentes dispuestos simétricamente y el rayo central de acuerdo con la Fig. 13, cuando $\Delta\varphi = \pi / 2$, $l_{th} = I_0 \times 40\%$, $\Delta z = 0$ (a) y $\Delta z = 0,2$ periodo en la dirección z (b).

5

[0022] El método propuesto para la formación de estructuras periódicas comprende la siguiente secuencia de operaciones. El rayo láser de pulso se divide en un número elegido de haces de 3 a 6, es decir, tres, cuatro o seis, y se dirigen a una película delgada depositada sobre el material de sustrato, simétricamente con respecto a la normal a la superficie de la película, de tal manera que interfieren allí formando una distribución periódica de intensidad de radiación láser. La intensidad total de los haces de láser de interferencia se elige de modo que sea más alto que el umbral de ablación de dicha película l_{th} , mientras que el umbral de ablación de la película sería entre aproximadamente 50% a aproximadamente 1,5% de la la intensidad I_0 formada en los máximos de la distribución de interferencias. Cambios de dicha intensidad total dentro de los límites especificados en la medida que se requieran para la formación de las imágenes de estructura periódica seleccionadas. Dicha imagen de interferencia se puede cambiar adicionalmente seleccionando la diferencia de fase $\Delta\varphi$ entre los haces láser de interferencia. Además, dicha imagen puede cambiarse dirigiendo el rayo láser central a lo largo de la dirección del eje de simetría de los haces de interferencia, y l o eligiendo la distancia entre dicha película y el punto de intersección de los haces a lo largo de la dirección de propagación del rayo central.

20

[0023] El método propuesto para la formación de estructuras periódicas en películas de material fino mediante haces láser interferentes 1-6 puede realizarse con el dispositivo, cuyo esquema óptico se muestra en la Fig. 1. El dispositivo tiene un láser de impulsos 7, en la trayectoria de propagación del rayo del cual están colocados secuencialmente: una unidad de control de energía de pulso de láser 8, (por ejemplo, atenuador, que consiste en célula Pockels y un polarizador de película delgada), un espejo reflectante alto 9, un elemento óptico difractivo 10 para dividir el rayo en 3, 4 o 6 haces (con, adicionalmente, incluyendo o excluyendo el rayo central), una lente de colimación 11, una unidad para controlar la diferencia de fase 12 (por ejemplo una placa de vidrio paralela), un diafragma 13 para la selección del rayo, una lente focal 14, una muestra 15 (película delgada sobre el sustrato), un dispositivo de posicionamiento para la muestra 16 (por ejemplo, un sistema de nanoposicionamiento piezoeléctrico XYZ de 3 ejes).

35

[0024] El esquema de formación del patrón de interferencia sin el haz central se muestra en la Fig. 2a, y con el rayo central presente se muestra en la Fig. 2b. Cuando el haz central está ausente, la imagen de interferencia no cambia en la dirección perpendicular a la superficie de la muestra z a lo largo de toda la zona de superposición de haz. El haz central genera una modulación adicional de la distribución de intensidad en la dirección z. Λ es el período de la imagen de interferencia en el plano XY, (en la superficie de la muestra, Y es perpendicular al plano de la imagen); Λ_z es el período de la imagen de interferencia en la dirección z, que es perpendicular a la superficie de la muestra; Δz es el desplazamiento a lo largo del eje z (el desplazamiento de la muestra con respecto a la posición del punto focal de la lente de enfoque).

40

[0025] A continuación, se proporcionan ejemplos de realización específicos del método, los cuales no limitan la amplitud de esta patente.

45

[0026] En el caso de los cuatro haces láser 1-4, dispuestos simétricamente de acuerdo con la Fig. 3, la distribución de intensidad en la zona de interferencia puede expresarse por la fórmula:

$$I_4(\mathbf{r}) \propto \left\langle [E_1(\mathbf{r}, t) + E_2(\mathbf{r}, t) + E_3(\mathbf{r}, t) + E_4(\mathbf{r}, t)]^2 \right\rangle \propto 4E_0^2 \left\{ \begin{array}{l} 1 + \frac{1}{2} \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + \varphi_1 - \varphi_2] + \\ \frac{1}{2} \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_3) \cdot \mathbf{r} + \varphi_1 - \varphi_3] + \\ \frac{1}{2} \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_4) \cdot \mathbf{r} + \varphi_1 - \varphi_4] + \\ \frac{1}{2} \cos[(\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3) \cdot \mathbf{r} + \varphi_2 - \varphi_3] + \\ \frac{1}{2} \cos[(\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_4) \cdot \mathbf{r} + \varphi_2 - \varphi_4] + \\ \frac{1}{2} \cos[(\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4) \cdot \mathbf{r} + \varphi_3 - \varphi_4] \end{array} \right\} \quad (1)$$

Donde E_i el campo eléctrico, el vector de onda k_i y la fase ϕ_i para cada uno de los 4 haces láser; r es un vector de coordenadas. Los índices indican los haces láser: 1, 2, 3 y 4.

5 **[0027]** La distribución de intensidad del campo de interferencia de los haces dispuestos simétricamente 1-4 (Fig. 3) mostrada en la Fig. 4a es una matriz cuadrada regular de máximos de interferencia, es decir, la estructura periódica estándar hecha de agujeros circulares

[0028] El periodo de red bidimensional Λ depende del ángulo entre los haces opuestos:

10
$$\Lambda_4 = (\sqrt{2}/2)(\lambda / \sin \Theta),$$

Donde $\theta = \frac{(k_1 \hat{z} k_2)}{2} = \frac{(k_3 \hat{z} k_4)}{2}$ es un semi-ángulo entre los haces opuestos y λ es la longitud de onda de la radiación láser. La distribución del campo de interferencia puede modificarse modificando la diferencia de fase (diferencia de trayecto óptico) $\Delta\phi$ entre los haces.

15 **[0029]** Dado que el sistema óptico tiene una simetría radial, por lo tanto, las fases de todos los haces de interferencia en el punto de intersección son iguales, o la diferencia de fase entre cada uno de los haces es igual a cero (puesto que todos los haces siguen el mismo camino óptico). Para introducir la diferencia de fase entre los haces es necesario crear una diferencia en la trayectoria óptica entre los haces, por ejemplo, en el trayecto del primer haz se coloca una placa de vidrio con el espesor d y el índice de refracción n , mientras que el segundo haz viaja a la misma distancia a través del espacio libre (aire), en ese caso la diferencia de trayectoria para los dos haces es igual a $d(n-1)$.

[0030] Esto da como resultado una diferencia de fase entre los haces

25
$$\phi_{12} = \frac{2\pi}{\lambda} d(n-1). \quad (2)$$

[0031] Cuando la diferencia de fase entre los haces pares (2, 4) y los impares (1, 3) es igual a $\pi/2$, desaparecen los máximos antiguos y los nuevos aparecen en los intervalos entre los anteriores.

30 **[0032]** El campo de interferencia puede ser alterado no sólo cambiando las diferencias de fase entre los haces. La naturaleza umbral de la ablación de película crea las condiciones para un control adicional sobre la forma de las estructuras periódicas formadas sobre la película metálica, y esa es la solución técnica buscada por esta invención.

35 **[0033]** La estructura, que se forma en la película de material, depende no sólo de la disposición de los haces láser y de la diferencia de fase entre los pares de haces. La evaporación de películas de material es de una naturaleza umbral: hay un mínimo de intensidad de láser I_{th} , que puede extirpar la película sobre todo su espesor. Por lo tanto, la intensidad del láser, que se utiliza para la irradiación, al elegirla con respecto al umbral de ablación, es una herramienta adicional para controlar la forma de las estructuras periódicas. Esto significa que el material es ablacionado en todas partes, donde la intensidad local del láser excede el valor de umbral de la intensidad I_{th} .

40 **[0034]** Cuando la diferencia de fase $\Delta\phi$ entre los haces pares (2, 4) y los impares (1, 3) es igual a $\pi/2$, y la intensidad umbral para la ablación de película I_{th} es cercana al 50% del nivel de intensidad láser I_0 en la interferencia máxima, la distribución del campo de interferencia es de tipo "tablero de ajedrez" (figura 4b). Como se muestra en la Fig. 4c., se fabricó dicha estructura aplicando un solo pulso de láser a una película de Cr de 100 nm de grosor, alineando con precisión el sistema óptico y eligiendo la intensidad del láser para el experimento, y manteniendo la diferencia de fase entre los haces pares (2, 4) y los impares (1, 3) para ser iguales a $\pi/2$, mientras

que la energía del impulso fue de 0,14 mJ.

- 5 **[0035]** Se modelaron varios tipos de estructuras periódicas con ordenador y se fabricaron usando una única ablación por impulsos de láser, cuando cuatro haces láser interfieren. Cuando la diferencia de fase $\Delta\phi$ entre los haces pares (2, 4) y los impares (1, 3) es igual a $\pi / 4$, y la intensidad del umbral para la ablación de la película es del 14% de intensidad del láser en el máximo de interferencia, la estructura producida usando el método de interferencia está constituida por elementos rectangulares, dispuestos como una red segmentada con pequeños espacios entre los segmentos (figura 4d).
- 10 **[0036]** Las estructuras tipo red se obtuvieron evaporando una película Cr de 100 nm de espesor, con un único impulso láser con la interferencia de 4 haces, ya que se utilizó un cambio monotónico de cambio de fase a través del campo de interferencia. (Figura 4e). Las estructuras fabricadas en las películas metálicas sobre el sustrato de vidrio muestran que es posible realizar en la práctica los cortes de distribución de interferencia en el umbral de ablación. El metal se ablacionó localmente en los lugares, donde la intensidad del láser supera el valor umbral. Las
- 15 estructuras periódicas de "tablero de ajedrez" y "neto" fueron producidas experimentalmente, ajustando con precisión la diferencia de fase y la intensidad del láser
- 20 **[0037]** Una estructura en forma de red se puede realizar en una película sobre el sustrato, cuando la diferencia de fase entre los haces pares (2, 4) y los impares (1, 3) $\Delta\phi$ es igual a $\pi/8$, y el umbral de ablación de la película está al nivel del 4% al máximo de la interferencia de la intensidad del láser (figura 4f). Tales estructuras pueden ser aplicadas para la fabricación de estructuras selectivas de frecuencia con las propiedades de filtrado espectral dentro del intervalo de luz visible.
- 25 **[0038]** En el caso de tres haces láser, dispuestos simétricamente de acuerdo con la Fig. 5, al nivel de umbral de ablación de la película de 11% al máximo de la interferencia de la intensidad del láser, la imagen producida de la estructura formada se muestra en la Fig. 6a. La estructura periódica formada de esta forma consiste en triángulos de pequeño tamaño, y puede ser utilizada como una antena de plasmón de superficie.
- 30 **[0039]** En el mismo caso, teniendo el umbral de ablación de la película a un nivel de 50%, la forma de la estructura formada, producida al máximo de la interferencia de la intensidad del láser, se muestra en la Fig. 6b, que es estándar.
- 35 **[0040]** En el caso de seis haces láser, dispuestos simétricamente de acuerdo con la Fig. 7, que tiene el umbral de ablación de la película a un nivel del 4%, la forma de la estructura formada, producida al máximo de la interferencia de la intensidad del láser, se muestra en la Fig. 8a. En el mismo caso, teniendo el umbral de ablación de la película al nivel del 11%, la forma de la estructura formada, producida al máximo de la interferencia de la intensidad del láser, se muestra en la Fig. 8b. Ambas estructuras se pueden utilizar para la fabricación de metamateriales con las propiedades del cristal fotónico o superficies selectivas de la frecuencia.
- 40 **[0041]** Toda la clase de estructuras periódicas puede fabricarse utilizando la interferencia de varios haces dispuestos simétricamente y del rayo central. En este caso, la distribución de interferencia además depende de la distancia entre dicha película y el punto de intersección de los haces dentro de ella, a lo largo de la dirección del rayo central.
- 45 **[0042]** En el caso de tres haces láser dispuestos simétricamente y un rayo central, dispuestos de acuerdo con la Fig. 9, al nivel umbral de ablación de la película de 6% al máximo de la interferencia de la intensidad del láser, la forma de la estructura formada se muestra en la Fig. 10a, mientras que en el nivel de umbral de ablación de la película de 11% al máximo de la interferencia de la intensidad del láser, la forma de la estructura formada se muestra en la Fig. 10b.
- 50 **[0043]** En el caso de seis haces láser dispuestos simétricamente y un rayo central, dispuestos de acuerdo con la Fig. 11, al nivel umbral de ablación de la película de 1,5% al máximo de la interferencia de la intensidad del láser, la forma de la estructura formada se muestra en la Fig. 12a, mientras que en el nivel umbral de ablación de película del 11% al máximo de la interferencia de intensidad del láser, la imagen producida de la estructura formada se muestra en la Fig. 12b.
- 55 **[0044]** En el caso de cuatro haces láser dispuestos simétricamente y un rayo central, dispuestos de acuerdo con la Fig. 13, al nivel umbral de ablación de la película del 40% al máximo de la interferencia de la intensidad del láser, y la diferencia de fase entre los haces pares (2, 4) y los impares (1, 3) $\Delta\phi$ es igual a $\pi/2$, la forma de la estructura

formada se muestra en la Fig. 14a, cuando la muestra está en el plano del punto focal de la lente de enfoque ($\Delta\phi = 0$). Cuando la muestra es desplazada por $\Delta z = 0,2\lambda z$ en la dirección z, teniendo las mismas condiciones, la forma de la estructura formada se muestra en la Fig. 14b.

- 5 **[0045]** Se crean todas las estructuras "no estándar", cuando la intensidad umbral de la evaporación de la película lth es menor que 50% de intensidad I_0 al máximo de la distribución de interferencias. Por estructuras "estándar" aquí nos referimos a las que pueden encontrarse en patentes o documentos publicados, es decir, orificios circulares dispuestos regularmente en una matriz cuadrada (4 haces) o hexagonal (3 o 6 haces).
- 10 **[0046]** La estabilidad de las estructuras formadas sobre un área grande requiere alta estabilidad de fase (alineación) y homogeneidad de exposición a través de toda el área de interferencia. Pueden aplicarse haces láser con forma plana para garantizar una mejor homogeneidad de las estructuras. Usando la duración del impulso láser corto de menos de 100 ps, la evaporación en la película es más rápida que la transferencia de calor, por lo tanto, la estructura de la imagen de interferencia permanece intacta a pesar de la posible fusión del material de la película.
- 15

20

25

30

35

40

45

50

Reivindicaciones

- 5 1. Método para la formación de estructuras periódicas en una película de material delgado (15) por haces de interferencia de laser pulsado, en el que la película delgada (15) se coloca sobre un sustrato (16) que tiene diferentes propiedades ópticas que la película delgada, comprendiendo el método:
- 10 - dirigir una pluralidad de haces láser pulsados dentro de la película delgada (15), por lo que los haces láser pulsados son haces láser de picosegundos que se intersectan de tal manera que producen a través de la interferencia una distribución periódica de la intensidad del rayo láser, que puede variar dependiendo de la elección de los parámetros de control apropiados incluyendo el número de haces láser interferentes y / o una diferencia de fase entre los haces láser de interferencia y / o la intensidad de cada rayo láser interferente, de acuerdo con la estructura periódica que se va a formar,
- 15 - ablación del material de la película fina en las zonas de alta intensidad de la distribución de intensidad del rayo láser, mientras que el material restante forma la estructura periódica que corresponde a la disposición de las zonas de baja intensidad, caracterizado porque la elección de los parámetros de control apropiados se realiza simultáneamente con un ajuste de la intensidad global de los haces láser interferentes de tal manera que la intensidad de umbral I_{th} para la evaporación de la película delgada sobre todo su espesor es de aproximadamente 1,5 por ciento hasta 50 por ciento de la intensidad I_0 al máximo de la zona de alta intensidad de la distribución de la intensidad del rayo láser, asegurando la evaporación de la película delgada.
- 20 2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que los haces láser de picosegundos tienen una duración de impulso <100 ps.
- 25 3. Procedimiento según la reivindicación 1 ó 2, en el que tres, cuatro o seis haces láser (1-6) de interferencia, dispuestos simétricamente con respecto a un rayo láser central (0) normal a la superficie de la película delgada, se dirigen a la película delgada y en la que la distribución de intensidad del rayo láser varía adicionalmente eligiendo la distancia Δz entre la película delgada (15) y el punto de interacción del rayo dentro de el a lo largo de la dirección de propagación del rayo central (0).
- 30 4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el material de película fina es un metal, preferiblemente cromo, aluminio, plata, cobre u oro, mientras que el material de sustrato es un material transparente, preferiblemente vidrio.
- 35 5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el material de película fina es un material eléctricamente conductor, preferiblemente óxido de indio-estaño, mientras que el material de sustrato es un material dieléctrico, preferiblemente polímero o vidrio.

40

45

50

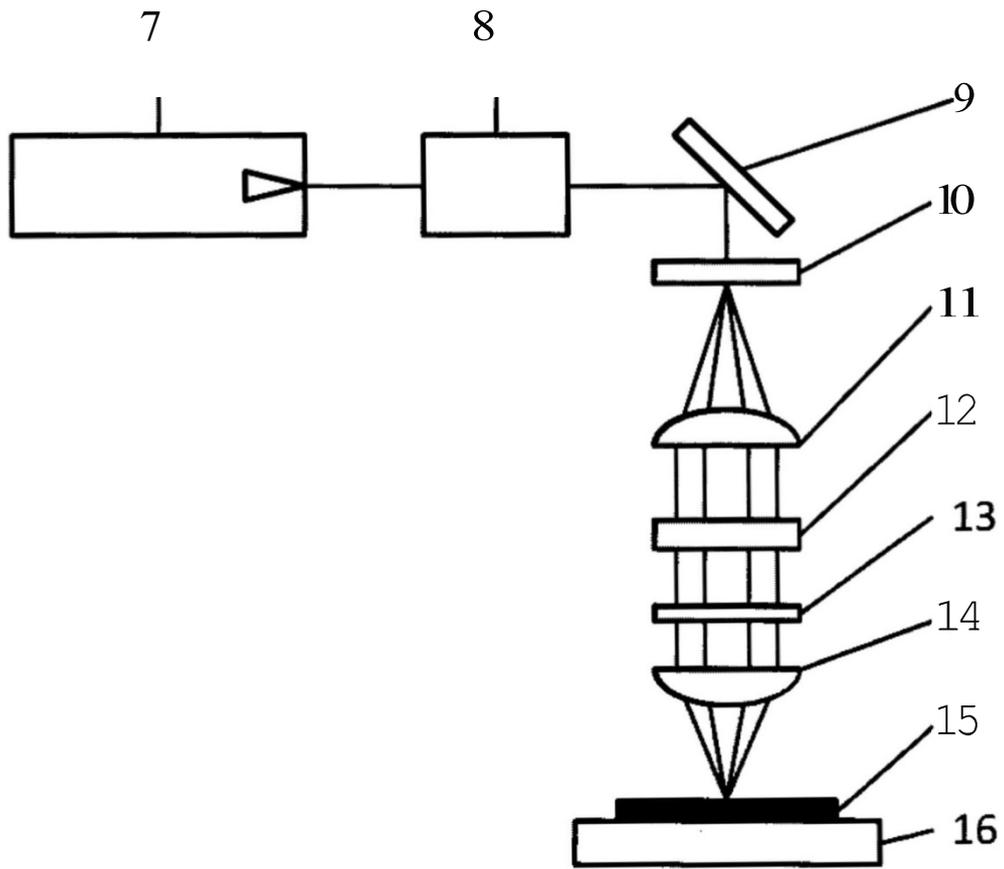


Fig.1

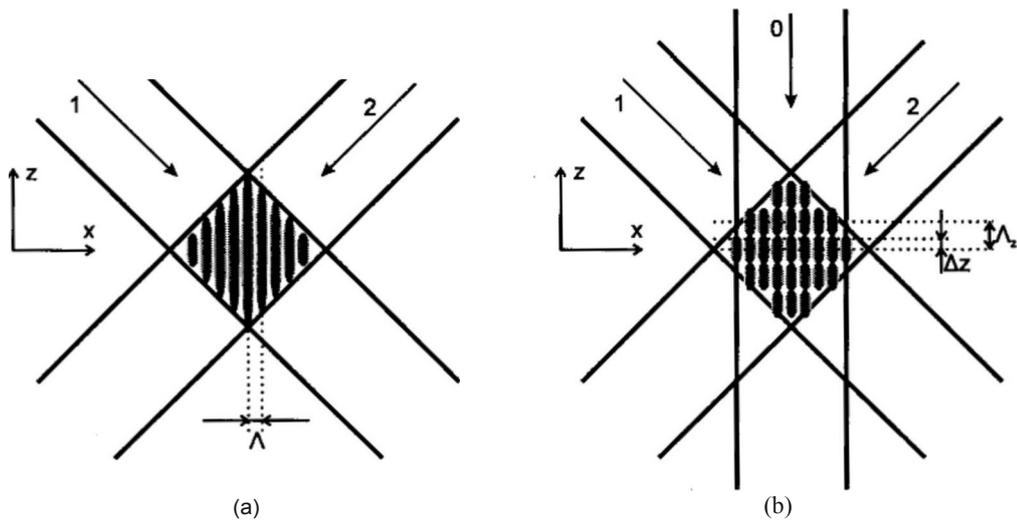


Fig.2

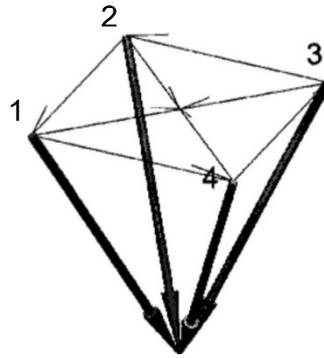


Fig.3

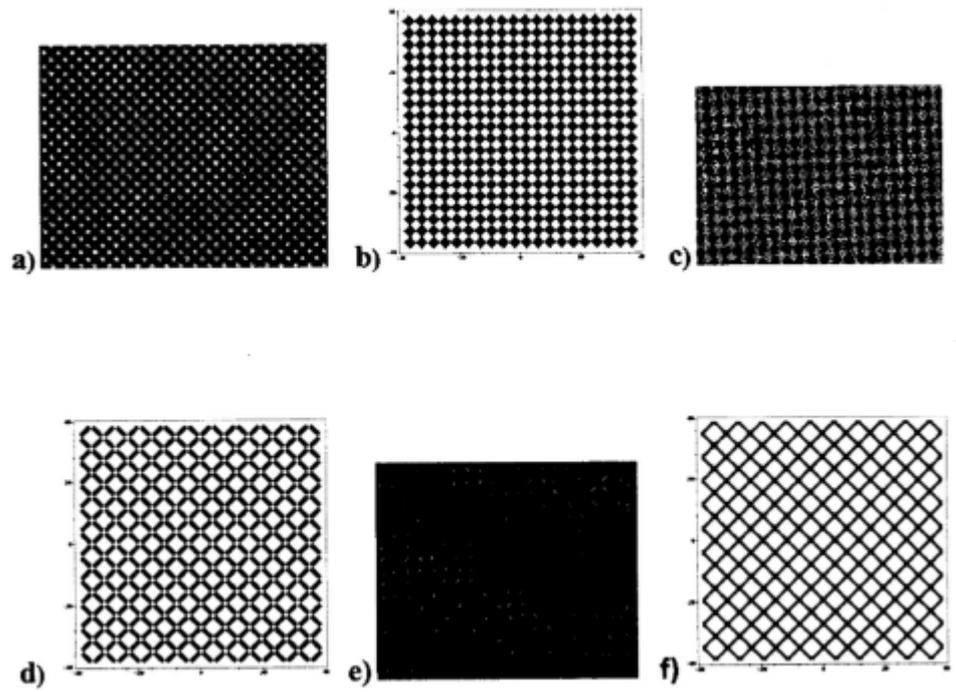


Fig.4

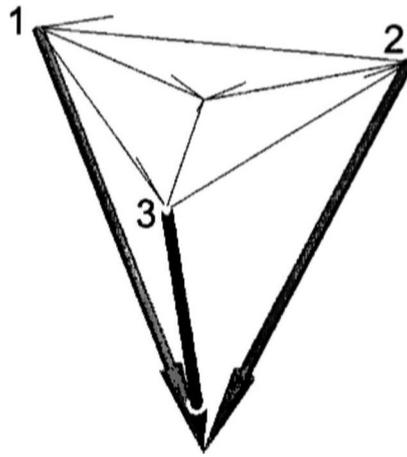
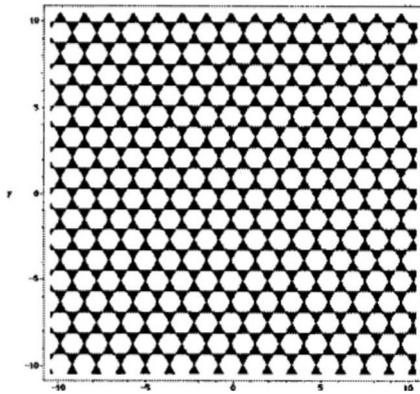
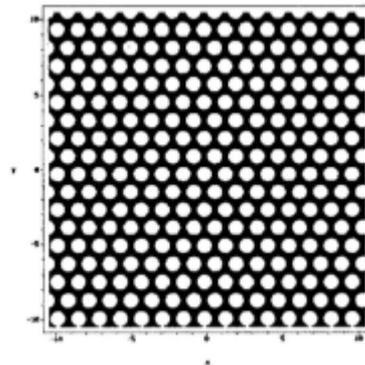


Fig.5



a)



b)

Fig.6

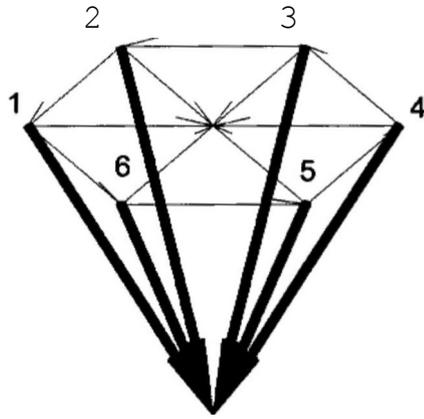
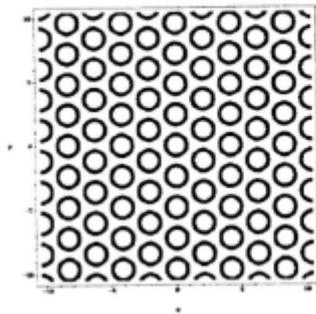
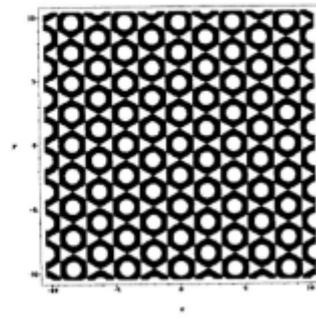


Fig.7



a)



b)

Fig.8

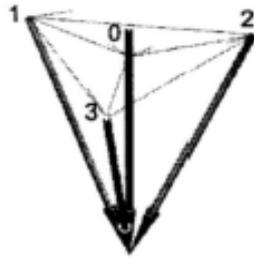


Fig.9



Fig.10

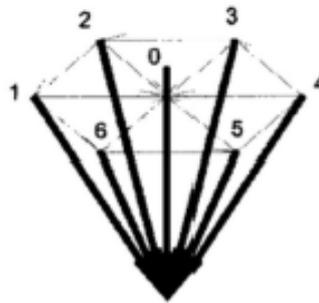


Fig.11

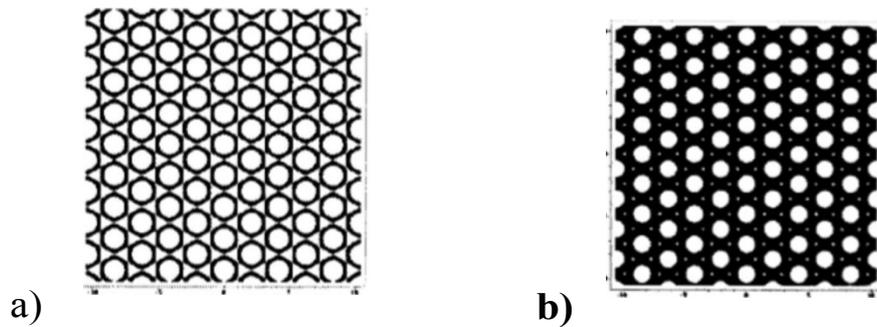


Fig.12

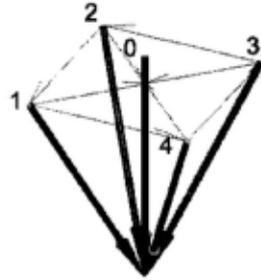


Fig.13

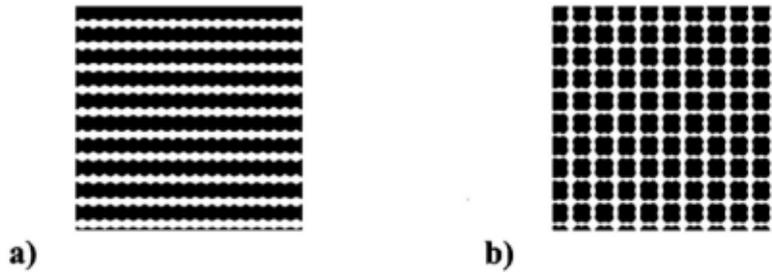


Fig.14