

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 623 093**

51 Int. Cl.:

<b>G02B 5/18</b>	(2006.01)
<b>G02B 27/00</b>	(2006.01)
<b>G01J 9/00</b>	(2006.01)
<b>G02B 5/00</b>	(2006.01)
<b>G02B 27/58</b>	(2006.01)
<b>B82Y 20/00</b>	(2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.11.2013 PCT/EP2013/075167**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.06.2014 WO2014083182**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.11.2013 E 13814446 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.01.2017 EP 2926187**

54 Título: **Dispositivo de control de la fase de un frente de onda óptico**

30 Prioridad:

**30.11.2012 FR 1261491**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**10.07.2017**

73 Titular/es:

**OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AÉROSPATIALES (ONERA) (50.0%)  
Chemin de la Hunière  
91120 Palaiseau, FR y  
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (C.N.R.S.) (50.0%)**

72 Inventor/es:

**LEVESQUE, QUENTIN;  
BOUCHON, PATRICK;  
RIAD, HAIDAR y  
PARDO, FABRICE**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

ES 2 623 093 T3

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

## DESCRIPCIÓN

Dispositivo de control de la fase de un frente de onda óptico

5 **Dominio técnico de la invención**

La presente invención se refiere a un dispositivo de control de la fase de un frente de onda óptico y un procedimiento de realización de dicho dispositivo.

**Estado del arte**

10 la miniaturización de los sistemas ópticos a la escala de la sub-longitud de onda -para unas longitudes de onda comprendidas típicamente entre 400 nm y 100 μm - con el fin de realizar unas funciones ópticas específicas, tecnológicamente realizables y que presentan unas aplicaciones industriales directas, se ha vuelto actualmente un desafío industrial. Permite principalmente una mejor integración de los sistemas ópticos, una mayor robustez y la posibilidad del acoplamiento directo entre la óptica y la electrónica.

15 El artículo de P. Lalanne y al. ("Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff", JOSA A, Vol. 16, No. 5, 1999) presenta una primera técnica de realización de una lente y de un prisma con la ayuda del grabado laminar de un material dieléctrico. El índice óptico de una zona varía entre un valor máximo impuesto por el índice del dieléctrico utilizado y un valor mínimo, el índice del aire. La relación entre la cantidad de material dieléctrico y el del aire define el índice óptico de la zona. Un dispositivo similar ha sido presentado en la solicitud de patente US2009/0020690. Dicha técnica permite realizar fuertes modulaciones de índice mientras se utilizan procedimientos tecnológicos conocidos. Sin embargo, las estructuras que inducen un índice efectivo medio a la escala de la longitud de onda, la modulación de la fase del frente de onda óptico a escalas inferiores a la longitud de onda no pueden ser obtenidas por la simple estructuración a la escala nanométrica del material dieléctrico. Este último punto constituye una limitación física importante para el control de la fase del frente de onda a la escala de sub-longitud de onda.

20 Otra técnica, descrita en el artículo de H. Shi y al. ("Beam manipulating by metallic-slits with variants widths", Optics Express, Vol 13, No. 18, 2005) o en la solicitud de patente WO2011/100070, permite una modulación de la fase del frente de onda a una escala más pequeña que la longitud de onda según esta técnica, la nano estructuración de una capa metálica espesa con la forma de láminas permite la modulación de un frente de onda luminoso incidente. Más precisamente, cada ranura obtenida se comporta como una guía de onda independiente de las otras en la que se propagan unos modos de plasmones acoplados. Se muestra (ver por ejemplo S. Collin y al. "Waveguiding in nanoscale metallic apertures", Optics Express, Vol. 15, No.7, 2007) que el índice efectivo  $n_{eff}$  visto por el modo que se propaga en la guía de onda así realizada depende de la anchura  $w$  de la ranura según una función que puede estar aproximada bajo determinadas condiciones por la siguiente ecuación (1):

$$40 \quad n_{eff} = n \left( 1 + \frac{\delta}{w} \right) \quad (1)$$

donde  $n$  es el índice del material dieléctrico con el que está rellena la ranura y  $\delta$  designa el espesor de piel óptico del metal. La figura 1 representa así la evolución del índice efectivo en función de la anchura de la ranura para una longitud de onda de 650 nm para una capa que tenga un espesor de 1 μm. En este ejemplo, las ranuras están rellenas de aire, las paredes son de oro, con un espesor de piel óptico del orden de 25 nm. La figura 1 pone en evidencia la posibilidad, gracias a la técnica descrita, de cubrir un margen de índice efectivo que va de  $n$  a 3 veces  $n$  para unos valores de anchura de guía  $w$  de 12,50 nm ( $\delta/2$ ) a 250 nm ( $10\delta$ ), permitiendo así fuertes variaciones de fase de una ranura a otra gracias a la elección del anchura  $w$  de la ranura. Sin embargo, una gran modulación de índice ( $\Delta n > 0,5$ ) únicamente es posible para anchuras de ranura inferiores a dos veces el espesor de la piel en el metal ( $w < 2\delta$ ), por tanto, típicamente 50 nm para las longitudes de onda ópticas e infrarrojo (IR), lo que constituye una restricción tecnológica fuerte. Por otra parte, la figura 1 muestra la gran sensibilidad del índice efectivo a las variaciones de la anchura de la ranura y por tanto a las imprecisiones de fabricación. En una gama de anchura tal que  $5 \text{ nm} \leq w \leq 40 \text{ nm}$ , una variación de 1nm de anchura de la ranura conduce a un error en el índice efectivo de  $\Delta n_{eff}/n_{eff} \geq 0,13$ . La invención tiene como objeto proponer un dispositivo de control de la fase de un frente de onda a la escala de sub-longitud de onda, cuya estabilidad en función de las variaciones naturales del dispositivo es pequeña.

**Resumen de la invención**

60 Según un primer aspecto, la invención concierne un dispositivo de control de la fase de un frente de onda óptico incidente de longitud de onda comprendida en una banda espectral de utilización dada, que incluye un substrato al menos parcialmente transparente en dicha banda espectral y un conjunto de láminas dispuestas sensiblemente perpendicularmente a la superficie del substrato, en el que:

65 -dicho conjunto de láminas incluye una alternancia de láminas yuxtapuestas, respectivamente de material metálico, en un primer material dieléctrico y al menos un segundo material dieléctrico diferente del primer material dieléctrico,

de tal forma que forma unas estructuras de metal - multi dieléctrico- metal (MmultiDM) yuxtapuestas, de anchuras sub-longitud de onda, cada estructura forma una cavidad que presenta uno o varios modos de propagación, -los espesores respectivos de las láminas del primer material dieléctrico y del segundo material dieléctrico están ajustadas en cada una de dichas estructuras MmultiDM para introducir un desfase local de la fase del frente de onda, siendo dependiente el desfase inducido del índice efectivo del o de los modo(s) apto(s) a propagarse en dicha cavidad.

La depositante ha mostrado que dicho dispositivo presenta principalmente como ventaja respecto de los dispositivos de control de la fase descritos en el arte anterior, poder trabajar unas estructuras de mayor anchura, típicamente 10 veces superior al espesor de la piel óptica del material metálico, permitiendo así liberar las restricciones tecnológicas mientras se guarda el control de la fase del frente de onda a una escala de sub-longitud de onda. Por otra parte, es posible obtener valores de desfase local cuya sensibilidad frente a los defectos de estructura, principalmente frente a las variaciones de espesor de las láminas o anchuras de la cavidad, es reducida. Los espesores respectivos de las láminas de material dieléctrico están así ajustados para obtener localmente un desfase calculado a partir de una función óptica buscada para la realización de un componente óptico en una banda espectral de utilización dada, dicha función óptica puede ser muestreada sobre las estructuras MMultiDM del dispositivo.

Según una variante, las anchuras de las estructuras MmultiDM son elegidas sensiblemente iguales, únicamente los espesores respectivos de las láminas de material dieléctrico varían de una estructura a la otra para controlar el desfase local. Esto permite para un resultado equivalente, trabajar con unas anchuras de cavidad idénticas y suficientemente grandes frente al espesor de la piel óptica del metal, facilitando la fabricación del dispositivo.

Ventajosamente, para un funcionamiento del dispositivo en el infrarrojo, la anchura de cada estructura MmultiDM es elegida superior o igual a 10 veces el espesor de la piel óptica del material metálico.

Según una variante, la anchura de las estructuras MmultiDM es por otra parte elegida inferior o igual a  $\lambda_{\min}/2n_H$  donde  $\lambda_{\min}$  es la longitud de onda mínima de la banda espectral de utilización y  $n_H$  es el índice de refracción del material dieléctrico de índice más elevado. Esta elección de anchura para las estructuras MmultiDM permite la realización de cavidades monomodo, cuya depositante ha mostrado que presentan una muy buena eficacia de transmisión gracias al buen confinamiento de los modos longitudinales.

Ventajosamente, se elegirán dos tipos de material dieléctrico diferentes para formar las estructuras, cada estructura incluye así una primera lámina de un primer material dieléctrico y una segunda lámina de un segundo material dieléctrico diferente del primer material dieléctrico para formar una estructura metal - dieléctrico - dieléctrico - metal (MDDM). La depositante ha mostrado que las estructuras MDDM representan un excelente compromiso entre el resultado buscado y las restricciones tecnológicas.

Ventajosamente, las láminas presentan una altura dada sensiblemente idéntica. La altura de las láminas determina el valor máximo de desfase local que puede ser aplicado a la fase del frente de onda incidente. Ventajosamente, la altura  $h$  es elegida para obtener un valor máximo de desfase local de  $2\pi$ , lo que es suficiente para generar cualquier función óptica, y permite guardar una altura de láminas mínima y, en consecuencia, formar unas cavidades de pequeña relación de aspecto (relación altura sobre anchura).

Según una variante, las láminas son sensiblemente rectilíneas y las estructuras MmultiDM están situada según una dirección principal. Esta configuración permite por ejemplo realizar componentes ópticos del tipo prisma óptico, lente óptica cilíndrica, y de forma general, lente asimétrica o cualquier función óptica con una dimensión. Estos componentes serán sensibles a la polarización y podrán permitir igualmente formar un dispositivo separador en polarización.

Según otra variante, las láminas son igualmente sensibles rectilíneas pero las estructuras MmultiDM situadas según al menos dos direcciones principales, ventajosamente sensiblemente perpendiculares. Esta configuración permite realizar como anteriormente unas funciones ópticas del tipo lente óptica cilíndrica o prisma óptico el dispositivo podrá ser concebido de tal forma que los perfiles de la función óptica realizada sean idénticos según las dos direcciones, permitiendo hacer que el dispositivo sea insensible a la polarización.

Alternativamente, unos perfiles diferentes según las dos direcciones permitirán generar unas propiedades específicas en función de la polarización. Es así posible concebir un dispositivo separador de componentes TE y TM de una onda incidente polarizada de forma aleatoria, por ejemplo, una lente que tenga una primera distancia focal para la componente TE de la polarización y una segunda distancia focal, diferente de la primera distancia focal, para la componente TM de la polarización.

Según otra variante, las láminas son curvilíneas, las estructuras MmultiDM pueden estar situadas según una variante según una simetría axial. Esta configuración permite realizar unos componentes ópticos de simetría de revolución, por ejemplo, una lente óptica esférica, convergente o divergente, o cualquier otra función óptica simétrica. Como anteriormente, una función óptica de simetría axial permite la realización de un dispositivo

insensible a la polarización mientras que la realización de una función óptica asimétrica podrá permitir la separación de los componentes de la polarización de una onda incidente.

5 Según una variante, el sustrato es de un material dieléctrico, el material dieléctrico que forma el sustrato es idéntico a uno de dichos materiales dieléctrico es que forma las láminas la utilización de un mismo material para el sustrato y una de las láminas de la estructura permite principalmente simplificar el método de fabricación.

10 Según una variante, uno de dichos materiales dieléctricos es el aire bastará entonces, durante el método de fabricación, con grabar unas ranuras en el lugar de las láminas destinadas a estar formadas por aire.

15 La invención concierne según un segundo aspecto un sistema de detección que incluye un dispositivo de control de la fase de un frente de onda incidente según el primer aspecto y un detector, en el que las estructuras MmultiDM del dispositivo están dimensionados para introducir un desfase local del frente de onda, cada desfase local está determinado por una muestra de una función óptica correspondiente a la de una lente convergente.

Según un tercer aspecto, la invención concierne un método de control de la fase de un frente de onda óptico por medio de un dispositivo según el primer aspecto que incluye:

20 -el proceso de edición espacial del frente de onda para formar un frente de onda incidente que cubre el conjunto de las láminas del dispositivo,

-la transición para cada una de las estructuras MmultiDM de una porción del frente de onda incidente que permite la introducción de un desfase local sobre dicho frente de onda.

Según un cuarto aspecto, la invención concierne un método de fabricación de un dispositivo de control de la fase de un frente de onda incidente según el primer aspecto que incluye:

25 -el grabado de una capa en un primer material dieléctrico para formar un primer conjunto de ranuras en la ubicación de las láminas de material metálico,

-la deposición del metal en el lugar de dichas ranuras,

30 -el grabado de dicha capa para formar un segundo conjunto de ranuras en el lugar de las láminas del segundo material dieléctrico.

Según una variante, el método incluye la deposición en el lugar de dichas ranuras del segundo conjunto de ranuras de un segundo material de material dieléctrico.

35 Según una variante, la capa del primer material dieléctrico forma el sustrato. Alternativamente, el método puede incluir una etapa previa de deposición de dicha capa de primer material dieléctrico sobre un sustrato.

Según un quinto aspecto, la invención concierne un método de fabricación de un dispositivo de control de la fase de un frente de onda incidente según el primer aspecto, que incluye:

40 -el apilamiento de las capas respectivamente de material metálico y de material dieléctrico con el fin de formar dicho conjunto de láminas,

-el recorte y el pulido del apilamiento realizado y la fijación sobre un sustrato sensiblemente perpendicular al plano de las capas,

-el pulido de la cara opuesta al sustrato.

#### 45 **Breve descripción de los dibujos**

Otras ventajas y características de la invención aparecerán con la lectura de la descripción, ilustrada por las siguientes figuras:

50 Figura 1 (ya descrita), una curva que muestra la evolución del índice efectivo  $n_{eff}$  en una ranura en función de la anchura  $w$  de la ranura, en un dispositivo de control de la fase de un frente de onda según el arte anterior,

Figura 2, un esquema que ilustra el principio de un ejemplo de estructura MDDM en un dispositivo según la invención;

55 Figura 3, unas curvas que muestran unas simulaciones numéricas de la variación del índice y de la fase de una estructura del tipo MDDM rellena de aire y de Arsenio de galio (GaAs) en función del factor de relleno ( $f$ ) de GaAs para unas anchuras  $w$  de la estructura diferentes;

60 Figuras 4, una curva que ilustra la función de fase buscada en el caso de la aplicación para la realización del dispositivo del tipo lente óptica convergente y la función muestreo resultante;

La figura 5, un ejemplo de realización de un dispositivo según la invención para la realización de una función del tipo de la función óptica mostrada en la figura 4;

65

La figura 6, una cartografía de la intensidad luminosa calculada después de la modulación de la fase de un frente de onda incidente en un dispositivo del tipo del de la figura 5;

5 Las figuras 7A a 7C ilustran, en planta, unos ejemplos del dispositivo en el que las láminas tienen forma respectivamente rectilínea (Figuras 7A y 7B) y curvilínea (Figura 7C).

**Descripción detallada**

10 La figura 2 muestra un esquema que ilustra el principio de un ejemplo de estructura metal- multi dieléctrico-metal (MmultiDM) en un ejemplo de dispositivo 20 de control de la fase según la invención. El dispositivo 20 está adaptado al control de la fase de un frente de onda que presenta una longitud de onda comprendida en una banda espectral de utilización dada del dispositivo. La banda espectral puede estar comprendida entre 400 nm y 100 μm. El dispositivo 20 incluye un substrato 21, transparente o parcialmente transparente en la banda espectral de utilización y un conjunto de láminas (referenciadas 22<sub>i</sub>, 23<sub>i</sub>, 24<sub>i</sub>, 22<sub>j</sub>, 23<sub>j</sub>, 24<sub>j</sub>, 22<sub>k</sub>, etcétera en la figura 2) de altura h, dispuestas  
15 sensiblemente perpendicularmente a la superficie del substrato. Las láminas están situadas de tal forma que forme en una alternancia de láminas yuxtapuestas, respectivamente de material metálico (22<sub>i</sub>), de un primer material dieléctrico (23<sub>i</sub>) y al menos un segundo material dieléctrico (24<sub>i</sub>) diferente del primer material dieléctrico, y de nuevo de material metálico (22<sub>j</sub>), de un primer material dieléctrico (23<sub>j</sub>), de un segundo material dieléctrico (24<sub>j</sub>) etcétera de tal forma que forme unas estructuras S<sub>i</sub> metal-multi dieléctrico-metal (MmultiDM) yuxtapuestas. Aunque en el  
20 ejemplo de la figura 2, cada estructura S<sub>i</sub> únicamente incluya dos láminas (23<sub>i</sub>, 24<sub>i</sub>) de materiales dieléctricos diferentes, es igualmente posible formar un dispositivo con en cada estructura, una alternancia entre dos láminas de material metálico (22<sub>i</sub>, 22<sub>j</sub>) de tres lamas o más de materiales dialécticos diferentes.

25 Cada estructura S<sub>i</sub> metal-multi dieléctrico-metal presenta una anchura w<sub>i</sub> (definida entre dos láminas metálicas 22<sub>i</sub> y 22<sub>j</sub>) de sub-longitud de onda, es decir inferior a longitud de onda mínima λ<sub>min</sub> de la banda espectral de utilización del dispositivo, la anchura w<sub>i</sub> es elegida de tal forma que forme una cavidad que presenta uno o varios modos de propagación de la banda espectral de utilización. Cuando una onda óptica de longitud de onda λ es incidente en el dispositivo 20, padece localmente a nivel de cada estructura S<sub>i</sub> un desfase ΔΦ<sub>i</sub> debido a la propagación de un modo en la cavidad formada por la estructura según la ecuación:

30

$$\Delta\Phi_i = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{eff} - n_L)h \quad (2)$$

35 Donde n<sub>eff</sub> es el índice efectivo del modo que se propagan la cavidad y n<sub>L</sub> es el índice de refracción “bajo”, es decir el índice de refracción del material dieléctrico de menor índice. En la ecuación (2) anterior, el desfase ΔΦ<sub>i</sub> está medido respecto a un desfase de referencia, definido aquí por el desfase padecido por el frente de onda incidente cuando atraviesa una lámina de espesor h y de índice de refracción n<sub>L</sub>. Particularmente, la naturaleza de los materiales dieléctricos presentes en la estructura modifica el índice efectivo del modo que se propaga. Eligiendo en cada estructura S<sub>i</sub> el espesor de cada una de las láminas de material dieléctrico, es posible modificar el índice  
40 efectivo del modo de propagación en la cavidad formada y por tanto el desfase introducido localmente.

En la práctica, se podrá elegir unos materiales dialécticos que presenten unas diferencias de índice de refracción importantes con el fin de crear unos desfases locales importantes con una altura de lámina pequeña. En lo que sigue, se llamará índice “alto” n<sub>H</sub> al índice de refracción del material dieléctrico que presenta el índice de refracción más elevado e índice “bajo” n<sub>L</sub> al índice de refracción del material dieléctrico que presenta el índice de refracción más pequeño. Para el material dieléctrico de índice de refracción más elevado, se podrá elegir por ejemplo un material dieléctrico transparente en la banda espectral de utilización del dispositivo y que presenta un índice óptico elevado en esta banda espectral por ejemplo, para un funcionamiento del dispositivo de control de fase en la banda II y III, se puede elegir de forma no limitativa, el Arsenio de galio (GaAs) cuyo índice de refracción vale 3,3, el germanio (Ge) cuyo índice de refracción vale alrededor de 4, el silicio amorfo (Si a) de índice de refracción igual a 3,7, el silicio (SiO2) de índice de refracción igual a 1,5 para unas longitudes de onda inferiores a 5 μm, el sulfuro de zinc (ZnS) de índice de refracción igual a 2,2.

55 Para un funcionamiento del dispositivo de control de la fase en la banda visible e infrarroja, se puede elegir de forma no limitativa, el seleniuro de zin (ZnSe) o el sulfuro de Zinc (ZnS) cuyo índice de refracción vale 2,2 para el material dieléctrico de índice de refracción menos elevado, se podrá ventajosamente elegir el aire, permitiendo hacer máxima la diferencia entre los índices de refracción altos y bajos.

60 El desfase máximo está dado por la altura h de las láminas. Así, la altura h mínima de las láminas puede estar determinada para asegurar un desfase máximo ΔΦ<sub>max</sub> dado por la ecuación:

$$h = \Delta\Phi_{max} \frac{\lambda_{max}}{2\pi(n_H - n_L)} \quad (3)$$

65 Donde λ<sub>max</sub> es la longitud de onda máxima de la banda espectral de utilización, n<sub>H</sub> y n<sub>L</sub> son los índices de refracción alto y bajo respectivamente. Por ejemplo, la altura h de las láminas puede ser elegida para que el desfase máximo

$\Delta\Phi_{\max}$  de la fase sea de  $2\pi$ , lo que es suficiente para definir el conjunto de funciones ópticas y permite limitar la altura total de la estructura. Típicamente en el caso de una banda de utilización en el infrarrojo, por ejemplo, entre 3 y 5  $\mu\text{m}$ , eligiendo como índices alto y bajo respectivamente los del GaAs ( $n_H=3,3$ ) y el del aire ( $n_L=1$ ), una altura de lámina  $h=2,2 \mu\text{m}$  será suficiente para alcanzar desfase local máximo de  $2\pi$ .

Las paredes o láminas metálicas  $22_i$  presentan ventajosamente unos espesores  $L_i$  superiores al espesor de piel del metal utilizado, un ejemplo del orden de dos veces el espesor de piel óptico del metal, asegurando así que el modo de propagación en la cavidad formada por una estructura  $S_i$  no está perturbada por las cavidades formadas por las estructuras vecinas. Así, en el caso de la utilización del oro como material metálico, las láminas de material metálico de las estructuras MmultiDM podrían ser del orden de 50nm la utilización del oro está privilegiada ya que los procedimientos de manipulación son perfectamente conocidos. Sin embargo, otros materiales metálicos pueden ser excelentes candidatos para la realización de las estructuras del dispositivo, como por ejemplo el cobre, el aluminio o la plata. Ventajosamente, la anchura  $w_i$  de una estructura  $S_i$  es elegida para que la cavidad formada sea monomodo, lo que permite encontrar un buen compromiso entre la eficacia del confinamiento del modo longitudinal apto para propagarse en la cavidad formada por la estructura y una anchura limitada de estructuras. Por ejemplo, para verificar en cada estructura la condición de una cavidad monomodo, la anchura  $w_i$  puede ser elegida de tal forma que verifique:

$$w_i \leq \frac{\lambda_{\min}}{2n_H} \quad (4)$$

Donde  $\lambda_{\min}$  es la longitud de onda mínima de la banda de utilización elegida para el dispositivo y  $n_H$  es el índice de refracción alto. Así, se podrá elegir típicamente unas anchuras  $w_i$  del orden de  $\lambda/10$ . Por otra parte, principalmente por motivos tecnológicos, en el caso de una utilización en el infrarrojo, se podrá elegir ventajosamente las anchuras de cavidad superiores o iguales a 10 veces el espesor de la piel óptica del metal.

El ejemplo de la figura 2 muestra un dispositivo de control de la fase particular utilizando unas estructuras metal-dieléctrico 1- dieléctrico 2- metal (MDDM), es decir incluyendo en cada estructura  $S_i$  dos láminas  $23_i$ ,  $24_i$  de materiales dieléctricos diferentes. Esta variante permite obtener tal y como se muestra más abajo un muy buen compromiso entre la precisión del control de la fase del frente de onda y la búsqueda de un método de fabricación simple de ejecutar. En este ejemplo, las estructuras  $S_i$  presentan las anchuras  $w_i$  sensiblemente iguales. Cada estructura  $S_i$  incluye entre dos láminas metálicas  $22_i$ ,  $22_i$  dos láminas  $23_i$ ,  $24_i$  de materiales dieléctricos diferentes denominados 1 y 2, la naturaleza de los materiales dieléctricos 1 y 2 es sin embargo la misma en cada una de las estructuras. En la práctica, se hace variar la proporción respectiva de los dos materiales dieléctricos en cada una de las estructuras. Así, se puede definir por ejemplo una tasa de llenado  $f_i$  del material dieléctrico 2 en la estructura  $S_i$ . El espesor de la lámina  $24_i$  del material dieléctrico 2 es entonces igual al producto  $f_i w_i$  para la estructura  $S_i$  y el espesor de la lámina  $23_i$  del material dieléctrico 1 es igual al producto  $(1-f_i)w_i$ . El índice efectivo del modo que se propagan cada estructura y por tanto del desfase local depende la tasa de relleno  $f_i$ .

La figura 3 ilustra así unas curvas que muestran el índice efectivo calculado en función del factor de relleno  $f_i$  en un dispositivo del tipo ilustrado en la figura 2, para diferentes valores de la anchura  $w_i$  de las estructuras. El desfase resultante (dado por la ecuación (2)) está igualmente representado (módulo  $2\pi$ ). Más precisamente, las curvas están calculadas con una altura de las láminas  $h=1 \mu\text{m}$ , un espesor de las paredes metálicas  $L_i=50 \text{ nm}$  y una longitud de onda en el medio incidente (el aire)  $\lambda=5 \mu\text{m}$ . Las curvas 31, 32,33 están obtenidas respectivamente para  $w=\delta$  (25 nm),  $w=2\delta$  (50nm) y  $w=20\delta$  (500nm), donde  $\delta$  es el espesor de piel del metal utilizado, por ejemplo el oro. Los materiales dieléctricos considerados son respectivamente el aire para el material dieléctrico 1 ( $n_L=1$ ) y el Arseniuro de galio (GaAs) para el material dieléctrico 2 ( $n_H=3,3$ ). El índice efectivo del modo está calculado de forma conocida mediante modelado de la propagación del modo fundamental en la cavidad, por ejemplo, mediante un método modal. Se ha tenido en cuenta la propagación en los materiales dieléctricos y las reflexiones a nivel de las interfaces con las paredes metálicas, así como la reflexión y la transmisión a nivel de la interfaz entre los dos materiales dieléctricos. Un programa de cálculo matricial (utilizando por ejemplo Python o Matlab) es por ejemplo utilizado para el modelado de la propagación y el cálculo del índice efectivo en función del factor de relleno  $f_i$ .

La figura 3 muestra cómo es posible hacer variar el índice efectivo del modo de propagación y por tanto el desfase local aplicado sobre el frente de onda incidente ajustando ya no la anchura  $w_i$  de la cavidad formada por la estructura sino el factor de relleno  $f_i$ . No es necesario para obtener unos fuertes desfases trabajar con esas anchuras de cavidad  $w_i$  pequeñas, ya que como aparece en la figura 3, una variación del desfase puede ser obtenida en función del factor de relleno, incluso para anchuras de cavidad tan grandes como  $20\delta$  (curva 33), lo que permite relajar las restricciones tecnológicas en la realización del dispositivo. Por otra parte, la figura 3 pone en evidencia la estabilidad del índice efectivo del modo, y por tanto del desfase local aplicado al frente de onda incidente, en función de la anchura  $w_i$  de la cavidad y del factor de relleno  $f_i$ . La depositante ha mostrado principalmente que eligiendo una anchura de cavidad  $w_i=500 \text{ nm}$  (por tanto  $\lambda/10$ ), una variación de 10 nm sobre la anchura  $w_i$  tiene una incidencia despreciable en el índice efectivo del modo de propagación ( $<1\%$ ) y una variación de 10 nm sobre la anchura de la lámina del material dieléctrico 2 correspondiente a una variación de 2% del factor de relleno conduce a una variación del índice efectivo  $\Delta n/n=0,03$ . Respecto al sistema del arte anterior descrito en H Shi y al. por ejemplo, la estabilidad

en el índice efectivo del modo de propagación está claramente mejorada, permitiendo hacer el dispositivo mucho más fiable y menos dependiente de la precisión de la tecnología utilizada para la realización del dispositivo.

Se comprende fácilmente que yuxtaponiendo varias estructuras  $S_i$  tales como las descritas por ejemplo en la figura 2 y ajustando para cada una el factor de relleno de uno de los materiales dieléctricos, es posible modular un frente de onda incidente realizando un muestreo espacial de un frente de onda cuyo paso depende de la anchura de las estructuras  $S_i$  y aplicando localmente un desfase dado, elegido para realizar la función óptica deseada. El frente de onda puede ser extendido espacialmente previamente de tal forma que cubra el conjunto de las estructuras.

La figura 4 ilustra aquí el muestreo requerido para la realización de una lente convergente. Más concretamente, la curva 41 representa el perfil de fase de una lente de diámetro  $11,5 \mu\text{m}$  que tiene una distancia focal de  $6 \mu\text{m}$  a  $\lambda = 5 \mu\text{m}$  y una altura  $h = 2,2 \mu\text{m}$  y la curva 42 representa el muestreo espacial realizado sobre 21 estructuras. El perfil de fases se escribe:

$$\Phi(x) = \frac{2\pi x \sin(\theta)}{\lambda} + \frac{2\pi n_L F}{\lambda} - \frac{2\pi n_L \sqrt{F^2 + x^2}}{\lambda} \quad (5)$$

Donde  $F$  es la distancia focal de la lente que se busca realizar,  $\theta$  es el ángulo de incidencia ( $\theta = 0$  en el ejemplo de la figura 4),  $x$  es la distancia medida según una dirección normal a los planos de las láminas que forman las estructuras  $S_i$  y en el que una referencia ( $x=0$ ) es tomada a nivel de la estructura central del dispositivo.

La figura 5 ilustra un ejemplo de dispositivo 50 para la realización de un perfil de fase tal y como se ha representado en la curva 42 de la figura 4. El dispositivo incluye 21 estructuras  $S_i$  del tipo MDDM tales como las representadas en la figura 2. Cada estructura presenta una anchura  $w_i = 500 \text{ nm}$ , una altura  $h = 2,2 \mu\text{m}$  y un espesor de las láminas metálicas  $L_i = 50 \text{ nm}$ . El dispositivo incluye tres zonas, una zona superior 53 y una zona inferior 51 formadas respectivamente por aire y arseniuro de galio y una zona intermedia 52 que incluye las 21 estructuras MDDM. Los materiales dieléctricos que forman las láminas  $23_i$  y  $24_i$  de cada una de las estructuras  $S_i$  están formadas respectivamente por aire y arseniuro de galio. Los índices de refracción alto y bajo son por tanto respectivamente  $n_H = 3,3$  y  $n_L = 1$ . Más concretamente, en el ejemplo de la figura 5, las estructuras MDDM presentan un factor de relleno  $f_i$  del GaAs respecto del aire del 89%, 97%, 17%, 65%, 80%, 90%, 94%, 97%, 99%, 99%, 100%, 99%, 99%, 97%, 94%, 90%, 80%, 65%, 17%, 97% y 89% que permite alcanzar los desfases buscados a nivel de cada una de las estructuras. Dicho dispositivo puede estar dispuesto aguas arriba de un fotodetector 54 para focalizar la energía de una onda luminosa incidente transmitida a través del dispositivo y cuya fase está modulada.

La figura 6 representa una cartografía de la intensidad luminosa calculada en cada una de las zonas 51 a 53 del dispositivo 50 representado en la figura 5. Se verifica principalmente una convergencia de la energía luminosa en una zona 60, confirmando la realización de una lente convergente a escalas de sub-longitudes de onda.

En el ejemplo de las figuras 4 a 6, la hipótesis está realizada con un dispositivo que incluye unas láminas sensiblemente rectilíneas, orientadas según una dirección principal, estando calculado el desfase según el eje  $x$  normal a esta dirección de orientación de las láminas. La función óptica de la lente convergente resultante es por tanto una función de lente cilíndrica. Alternativamente, las láminas pueden ser rectilíneas según dos direcciones principales, o curvilíneas, por ejemplo, con forma generalmente circular, yuxtapuesta de tal forma que presente una simetría de revolución, con el fin de realizar una función óptica de lente convergente esférica.

Las figuras 7A a 7C ilustran así unas vistas superiores respectivamente del dispositivo representado en la figura 5, y de dispositivos cuyas láminas son rectilíneas, situadas en dos direcciones sensiblemente ortogonal es (figura 7B), y de forma circular (figura 7C).

El dispositivo 60 representado vista desde arriba en la figura 7B presenta una forma generalmente rectangular, con unas estructuras  $S_i$  yuxtapuestas, situada según una primera dirección ( $x$ ), y unas estructuras  $S'_i$  yuxtapuestas, situadas según una segunda dirección ( $y$ ) sensiblemente perpendicular a la primera dirección. Como en el ejemplo de las figuras 5 o 7A, cada estructura  $S_i$  o  $S'_i$  incluye una alternancia de láminas de material metálico ( $22_i$ ), de un primer material dieléctrico ( $23_i$ ) de un segundo material dieléctrico ( $24_i$ ) y de un material metálico ( $22_j$ ). Como se ha explicado anteriormente, un frente de onda incidente sobre dicho dispositivo va a padecer localmente, a nivel de cada estructura, un desfase local cuyo valor está ligado a los espesores relativos de las láminas del primero y segundo materiales dieléctricos. Es por tanto posible realizar una función óptica de dos dimensiones, por ejemplo, una función de lente óptica convergente. En el ejemplo de la figura 7B, el perfil de desfase introducido según uno u otro de los ejes  $x$  e  $y$  es idéntico. Se deduce que el dispositivo es insensible a la polarización de la onda incidente. Alternativamente, es posible formar unas estructuras según la ubicación según los ejes  $x$  e  $y$  y varían, de tal forma que forme un dispositivo de control de la fase cuya respuesta será diferente en función de la componente TE o TM de la polarización. Así, se podrá por ejemplo separar las componentes TE y TM de una onda incidente aleatoriamente polarizada. Por ejemplo, una función de lente óptica convergente podrá ser obtenida, cuya focal varía con la polarización.

El dispositivo 70 representado visto desde arriba en la figura 7C incluye unas láminas curvilíneas, de forma sensiblemente circular, situadas con una simetría axial. Como en los anteriores ejemplos, cada estructura  $S_i$  incluye una alternancia de láminas de material metálico (22<sub>i</sub>), de un primer material dieléctrico (23<sub>i</sub>), de un segundo material dieléctrico (24<sub>i</sub>) y de un material metálico (22<sub>j</sub>) de tal forma que un frente de onda incidente sobre el dispositivo va a padecer localmente, a nivel de cada estructura, un desfase local cuyo valor está ligado a los espesores relativos de las láminas del primer y segundo material dieléctricos. Por el hecho de la simetría axial, el dispositivo 70 es insensible a la polarización. Por ejemplo, las estructuras están situadas para generar una función óptica de lente convergente de foco dado. Alternativamente, es posible situar las láminas para obtener unas funciones ópticas asimétricas. Por ejemplo, las láminas pueden ser curvilíneas, pero no circulares, por ejemplo, elípticas, permitiendo separar los componentes TE y TM de la polarización de una onda incidente.

Es por tanto posible acceder a unas funciones de fase con unos perfiles cualquiera, incluidos los perfiles abruptos cuyas variaciones son pequeñas frente a la longitud de onda.

Varios métodos son posibles para la fabricación de un dispositivo de control de la fase de un frente de onda según la invención.

En el ejemplo del dispositivo 50 ilustrado en la figura 5, el sustrato está formado del mismo material dieléctrico que el utilizado para una de las láminas de cada estructura. El método de fabricación de dicho dispositivo puede incluir el grabado de un sustrato 51 (figura 5), por ejemplo, un sustrato de GaAs, para formar un primer conjunto de ranuras en la ubicación de las láminas 22<sub>i</sub> de material metálico, y posteriormente el crecimiento de metal en el lugar de las ranuras, por ejemplo, de oro. Se procede después al grabado del sustrato para formar un segundo conjunto de ranuras en la ubicación de las láminas 23<sub>i</sub> del primer material dieléctrico. Se obtiene entonces un dispositivo tal y como se ha representado en la figura 5, los primeros y segundos materiales dieléctricos están formados respectivamente por aire y GaAs.

Según una variante, si el primer material dieléctrico es distinto del aire, se puede producir el depósito en el lugar de las ranuras del segundo conjunto de ranuras del segundo material de material dieléctrico. Por otra parte, si el segundo material dieléctrico es distinto que el material que forma el sustrato, se puede proceder a una etapa previa de deposición de una capa del segundo material dieléctrico sobre un sustrato, y después son realizadas las mismas etapas que las descritas anteriormente.

Alternativamente, en el caso de un dispositivo de control del frente de onda que incluye unas láminas rectilíneas yuxtapuestas, por ejemplo un dispositivo del tipo del representado en las figuras 5 o 7A, la fabricación del dispositivo puede incluir el apilamiento de las capas respectivamente de material metálico y de material dieléctrico con el fin de formar la alternancia de las láminas que formarán el conjunto de las estructuras  $M_{multiDM}$  yuxtapuestas, y el recorte y el pulido del apilamiento realizado y la fijación sobre un sustrato del apilamiento sobre su cara pulida, sensiblemente perpendicular al plano de las capas. Después, se puede proceder al pulido de la cara del apilamiento opuesto al sustrato.

Aunque se ha descrito a través de un determinado número de ejemplos de realización detallada, el dispositivo de control de la fase de un frente de onda y el método de fabricación de dicho dispositivo incluye en diferentes variantes, modificaciones y perfeccionamientos que aparecerán de forma evidente al experto, entendiendo que estas diferentes variantes, modificaciones y perfeccionamientos forman parte del alcance de la invención, tal y como se define por las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

- 5 1.- Dispositivo (20,50) de control de la fase de un frente de onda óptico incidente de longitud de onda comprendida en una banda espectral de utilización dada, incluyendo un sustrato (21) al menos parcialmente transparente en dicha banda espectral y un conjunto de láminas (22<sub>i</sub>, 23<sub>i</sub>, 24<sub>i</sub>) dispuesta sensiblemente perpendicularmente a la superficie del sustrato, caracterizado por que:
- 10 -dicho conjunto de láminas incluye una alternancia de láminas yuxtapuestas, respectivamente de material metálico (22<sub>i</sub>), de un primer material dieléctrico (23<sub>i</sub>) y en al menos un segundo material dieléctrico (24<sub>i</sub>) diferente del primer material dieléctrico, de tal forma que forme unas estructuras (S<sub>i</sub>) metal-multi dieléctrico-metal (MmultiDM) yuxtapuestas, de anchuras (w<sub>i</sub>) de sub-longitud de onda, cada estructura forma una cavidad que presenta uno o varios modos de propagación,
- 15 -los espesores respectivos de las láminas del primer material dieléctrico y del segundo material dieléctrico están ajustados en cada una de dichas estructuras MmultiDM para inducir un desfase local ( $\Delta\theta_i$ ) de la fase del frente de onda, siendo dependiente del desfase local del índice efectivo de o de los modos aptos para propagarse en dicha cavidad.
- 20 2.- Dispositivo según la reivindicación 1, en el que cada estructura incluye una primera lámina de un primer material dieléctrico y una segunda láminas de un segundo material dieléctrico diferente del primer material dieléctrico, formando una estructura metal-dieléctrico-dieléctrico-metal (MDDM).
- 3.- Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, en el que las anchuras (w<sub>i</sub>) de las estructuras (S<sub>i</sub>) MmultiDM son sensiblemente iguales.
- 25 4.- Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes adaptado a una utilización en el infrarrojo, en el que la anchura de cada estructura (S<sub>i</sub>) MmultiDM es superior a 10 veces el espesor de la piel óptica del material metálico.
- 30 5.-Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la anchura de cada estructura (S<sub>i</sub>) MmultiDM es inferior a  $\lambda_{min}/2n_H$  donde  $\lambda_{min}$  es la longitud de onda mínima de dicha banda espectral y n<sub>H</sub> es el índice de refracción del material dieléctrico de índice más elevado.
- 35 6.- Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las láminas presentan una altura (h) dada, determinada para que el valor máximo de desfase local sea de  $2\pi$ .
- 7.- Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sustrato (21) es de material dieléctrico, el material dieléctrico que forma el sustrato es idéntico a uno de dichos materiales dieléctricos.
- 40 8.- Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que uno de dichos materiales dieléctricos es el aire.
- 9.- Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las láminas son sensiblemente rectilíneas y las estructuras MmultiDM están situadas según una dirección principal.
- 45 10.- Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que las láminas son sensiblemente rectilíneas y las estructuras MmultiDM están situadas según al menos dos direcciones principales.
- 50 11.- Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que las láminas son curvilíneas, las estructuras MmultiDM están situadas según una simetría axial.
- 55 12.- Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los espesores respectivos de las láminas de material dieléctrico están ajustados para obtener localmente un desfase calculado a partir de una función óptica buscada para la realización de un componente óptico en una banda espectral de utilización dada, dicha función óptica esta muestreada en el número de estructuras MmultiDM del dispositivo.
- 60 13.- Sistema de detección que incluye un dispositivo de control de la fase de un frente de onda incidente según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores y un detector, en el que las estructuras (S<sub>i</sub>) MmultiDM de dicho dispositivo están dimensionadas para introducir un desfase local del frente de onda, cada desfase local está determinado mediante muestreo de una función óptica correspondiente a la de una lentilla convergente.
- 14.- Método de control de la fase de un frente de onda óptico por medio de un dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12 incluyendo:

- el proceso de edición espacial de un frente de onda para formar un frente de onda incidente que cubre el conjunto de las láminas del dispositivo,
- 5 -la transmisión para cada una de las estructuras MmultiDM de una porción del frente de onda incidente permitiendo la introducción de un desfase local sobre dicho frente de onda.
- 15.- Método de fabricación de un dispositivo de control de la fase de un frente de onda incidente según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12 incluyendo:
- 10 -el grabado de una capa en un primer material dieléctrico para formar un primer conjunto de ranuras en el lugar de las láminas de material metálico,  
-la deposición del metal en el lugar de dichas ranuras,  
-el grabado de dicha capa para formar un segundo conjunto de ranuras en el lugar de las láminas del segundo material dieléctrico.
- 15 16.- Método de fabricación según la reivindicación 15, que incluye la deposición en el lugar de dichas ranuras del segundo conjunto de ranuras de un segundo material de material dieléctrico.
- 17.- Método de fabricación según una cualquiera de las reivindicaciones 15 o 16 que incluye una etapa previa de deposición de dicha capa del primer material dieléctrico sobre un sustrato.
- 20 18.-Método de fabricación de un dispositivo de control de la fase de un frente de onda incidente según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, incluyendo:
- el apilamiento de las capas respectivamente de material metálico y de materiales dialécticos con el fin de formar dicho conjunto de láminas,
- 25 -el recorte y el pulido del apilamiento realizado y la fijación sobre un sustrato sensiblemente perpendicular al plano de las capas,
- el pulido de la cara opuesta al sustrato.
- 30

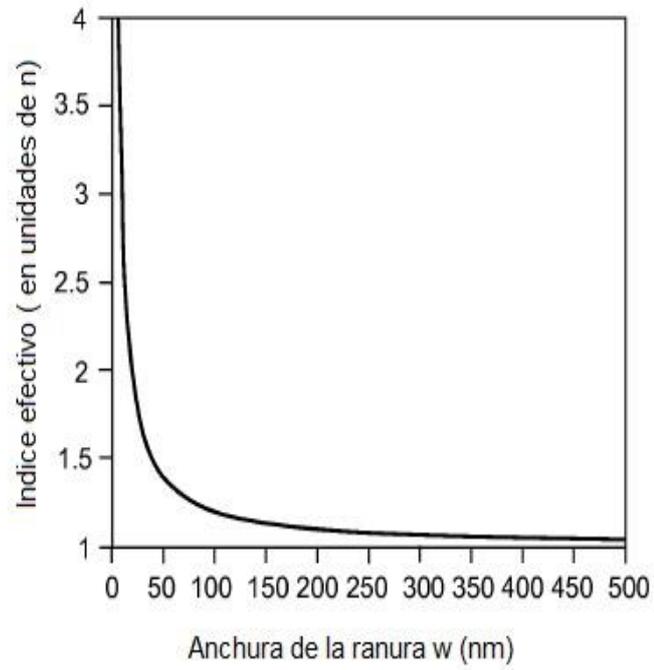


FIG.1  
ARTE ANTERIOR

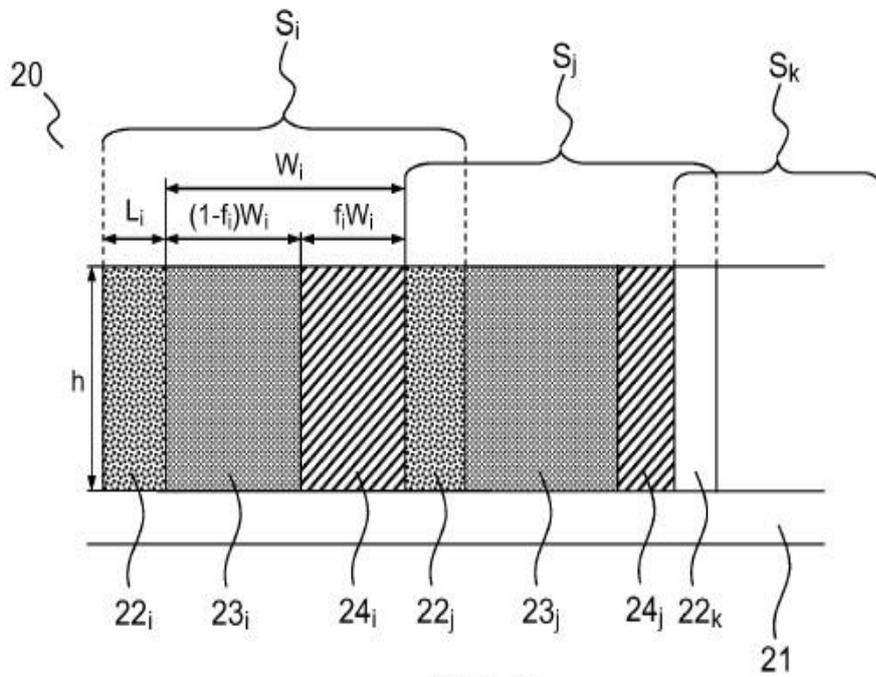


FIG.2

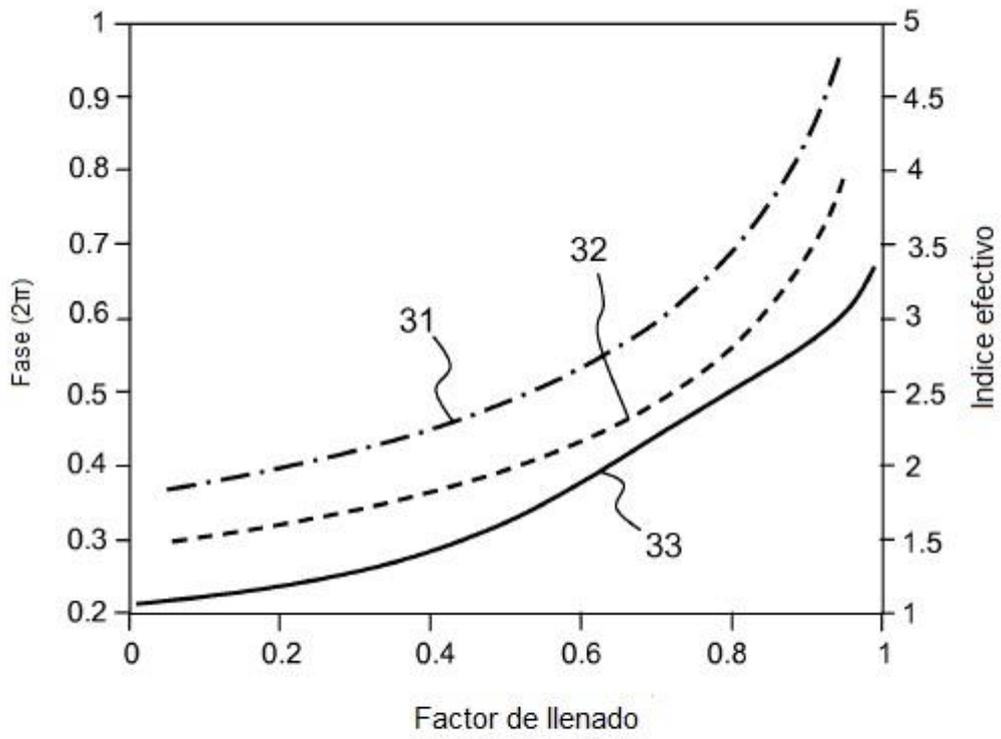


FIG.3

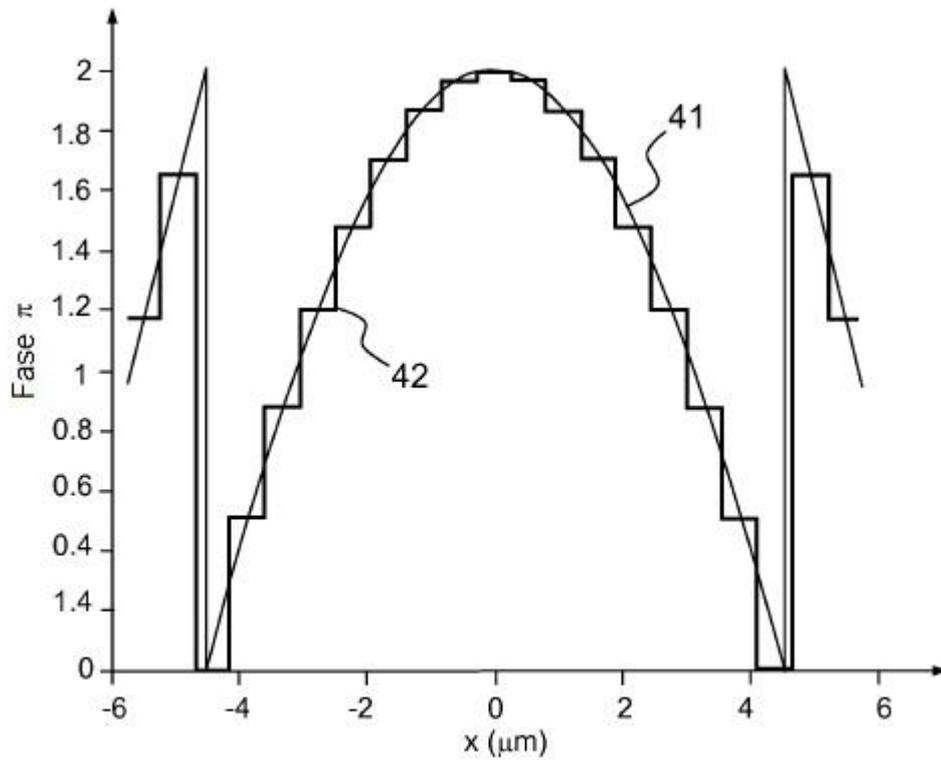


FIG.4

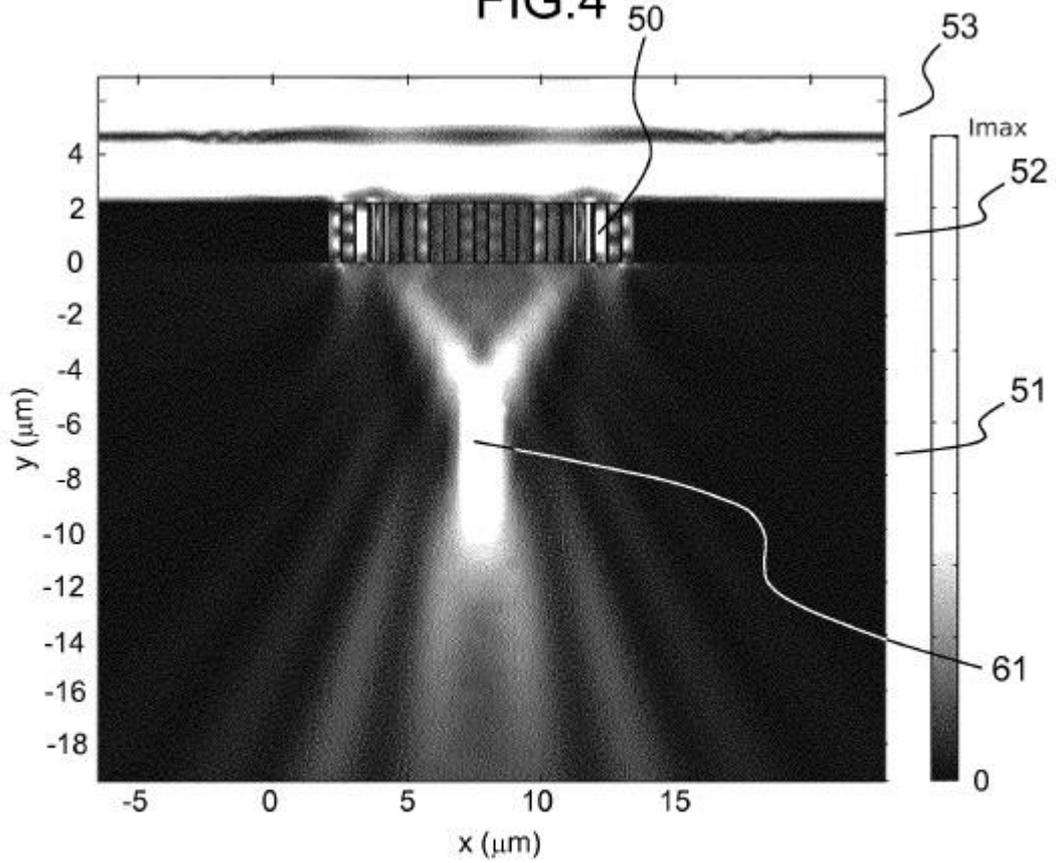


FIG.6

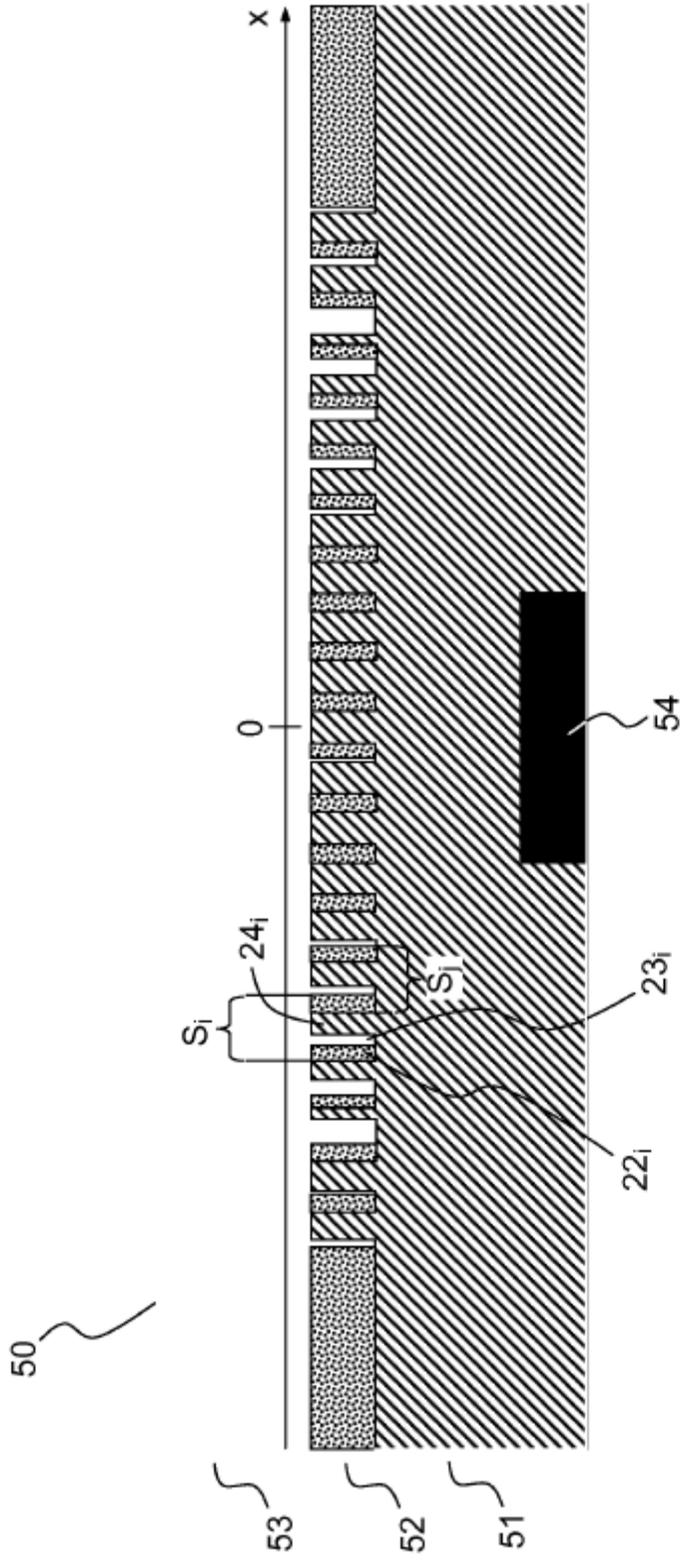
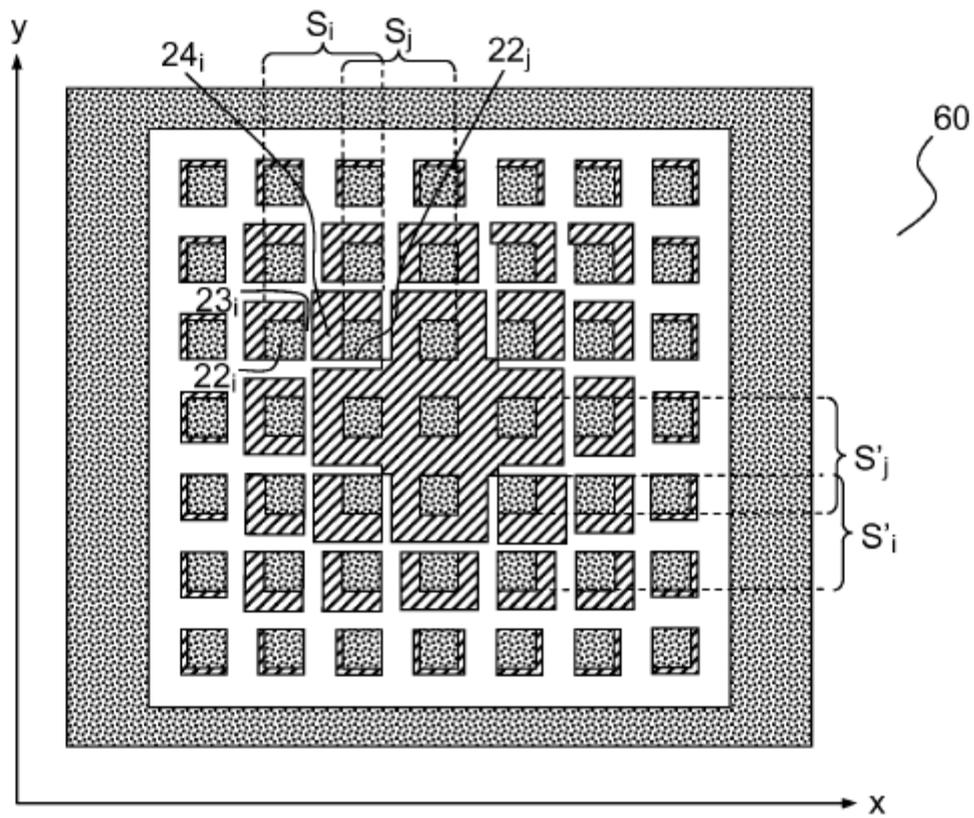
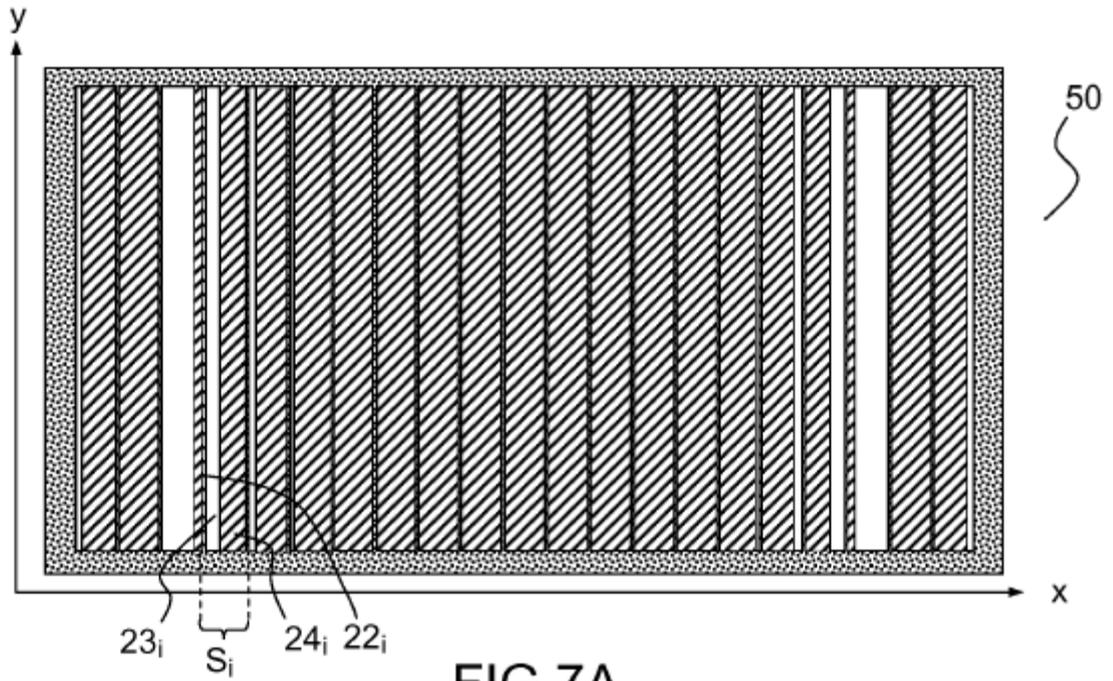


FIG.5



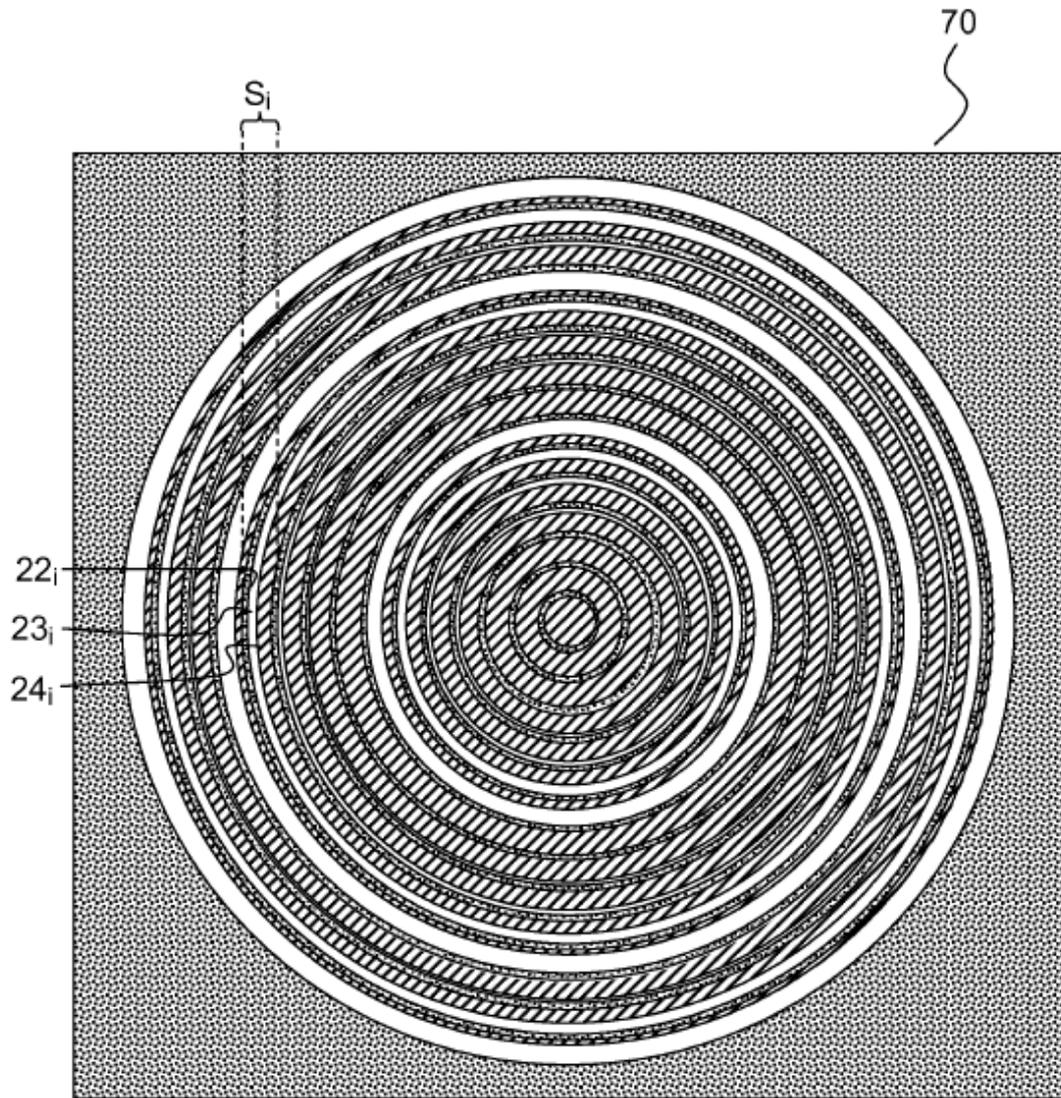


FIG.7C