

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 610 906**

51 Int. Cl.:

B82Y 20/00 (2011.01)

G01J 3/28 (2006.01)

G02B 5/18 (2006.01)

G02B 5/20 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.09.2011 PCT/EP2011/066029**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.03.2012 WO12035110**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.09.2011 E 11767949 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.10.2016 EP 2616855**

54 Título: **Filtro espectral de ancho de banda con fuerte selectividad y polarización controlada**

30 Prioridad:

17.09.2010 FR 1057449

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
04.05.2017

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE CNRS (50.0%)
3 rue Michel Ange
75794 Paris, FR y
OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE
RECHERCHES AÉROSPATIALES (ONERA)
(50.0%)**

72 Inventor/es:

**VINCENT, GRÉGORY;
HAIDAR, RIAD;
COLLIN, STÉPHANE y
PELOUARD, JEAN-LUC**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 610 906 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

Filtro espectral de ancho de banda con fuerte selectividad y polarización controlada

Campo de la técnica del invento

5 El presente invento se refiere a un filtro espectral con fuerte selectividad y polarización controlada, especialmente para la realización de filtros en infrarrojo.

Estado de la técnica.

10 Una técnica clásica conocida para realizar una función de filtrado de ancho de banda consiste en amontonar capas finas, poniendo cuidado e elegir el número, los espesores de las capas y la naturaleza de los materiales en función del umbral deseado para el filtro. La solicitud de patente WO2008122431 describe, por ejemplo, tal filtro, llamado filtro interferencial. Sin embargo, desde el momento en el que se hace intervenir a un gran número de finas capas, estos componentes presentan una fragilidad desde el momento en el que están sometidos a unos ciclos de variaciones de temperatura, por ejemplo, cuando están dispuestos en un criostato, especialmente para las aplicaciones en el infrarrojo. En efecto, estos ciclos conducen a una destrucción de la estructura debido a los coeficientes de dilatación térmica que, difieren de un material a otro y en consecuencia de una capa a otra, induciendo problemas. Además, un filtro que funciona en el infrarrojo necesitará capas más gruesas que un filtro que funciona en el visible, y muy rápidamente, se encontrará enfrentándose a dificultades tecnológicas relacionadas con el espesor, dificultades agravadas durante la realización de las matrices de los filtros por lo que habrá que hacer variar los espesores de un filtro a otro.

20 Por otra parte, para algunas aplicaciones, especialmente para la detección térmica, , puede ser interesante poder analizar la polarización de la onda incidente para distinguir el tipo de objeto detectado. Los componentes basados en la tecnología del apilado de capas finas no permiten una selectividad en función de la polarización.

Es conocido igualmente el asociar a una fina capa una red eléctrica (véase por ejemplo la solicitud de patente US5726805). Esta técnica presenta la ventaja de no utilizar nada más que una sola capa pero un filtro realizado mediante esta tecnología no puede nada más que cortar una banda cuando se utiliza en transmisión.

25 El documento WO2007/118895 describe un filtro espectral que comprende una capa metálica estructurada realizada mediante unas hendiduras que actúan como cavidades resonantes. La capa metálica está envuelta en unas capas de material dieléctrico por razones mecánicas relacionadas con el procedimiento de fabricación, estando depositada al mismo tiempo sobre una capa soporte.

30 Un objeto del invento consiste en proponer un filtro espectral, de ancho de banda cuando se utiliza en transmisión, que presente una fuerte selectividad en longitud de onda permitiendo al mismo tiempo un control de la polarización.

Resumen del invento.

35 Según un primer aspecto, el invento se refiere a un filtro espectral de ancho de banda, optimizado para la transmisión de una onda incidente con al menos una primera longitud de onda central λ_0 dada, que comprende una red metálica de espesor superior a unos $\lambda_0/50$ y que comprende al menos un primer conjunto de hendiduras sensiblemente idénticas, paralelas de anchura inferior a unos $\lambda_0/10$, separadas de manera periódica o casi periódica según un primer periodo inferior a la citada primera longitud de onda central, y que comprende además una capa de material dieléctrico de espesor e índice de refracción dado, acoplado con la red metálica para formar una guía de onda de las ondas difractadas por la red, estando adaptado el primer periodo de la red para que solo las órdenes 0 y ± 1 de una onda con incidencia normal y longitud de onda λ_0 sean difractadas en la capa de material dieléctrico, estando suspendido el conjunto capa dieléctrica y red en un fluido con un índice de refracción próximo a 1.

Según una primera variante, la red metálica tiene una dimensión con un solo conjunto de hendiduras paralelas, formando un filtro de ancho de banda polarizante.

45 Según una segunda variante, la red metálica tiene dos dimensiones, comprendiendo además un segundo conjunto de hendiduras, sensiblemente idénticas, paralelas, separadas de manera periódica o casi periódica según un segundo periodo, estando situadas las hendiduras del segundo conjunto según una dirección diferente de la de las hendiduras del primer conjunto.

50 Según un ejemplo de la segunda variante, la anchura de las hendiduras del segundo conjunto de hendiduras es sensiblemente idéntica a la de las hendiduras del primer conjunto de hendiduras y los dos periodos son idénticos. Cuando las hendiduras de los dos conjuntos de hendiduras son perpendiculares, el filtro así realizado es estrictamente no polarizante.

Según otro ejemplo de la segunda variante, los dos periodos son diferentes y el filtro está optimizado por el filtrado de una onda incidente con al menos una primera y una segunda longitudes de onda centrales λ_{01} y λ_{02} : los primero y segundo periodos son inferiores a las primera y segunda longitudes de onda respectivamente, y el periodo según cada una de las dimensiones está adaptado para que solo las órdenes 0 y 1 de una onda con incidencia normal y

longitud de onda λ_{01} ó λ_{02} respectivamente sean difractadas en la capa de material dieléctrico. El filtro así obtenido es polarizante y la longitud de onda filtrada depende de la polarización.

5 Según una tercera variante, la red metálica tiene dos dimensiones, comprendiendo una pluralidad de conjuntos de hendiduras, sensiblemente idénticas, paralelas, separadas de manera periódica o casi periódica, estando situadas las hendiduras de cada uno de los conjuntos de hendiduras según direcciones diferentes para formar un motivo repetido según dos direcciones, siendo, por ejemplo hexagonal o en forma de paralelogramo.

Según una u otra de las variantes, la capa de material dieléctrico puede ser estructurada según un motivo sensiblemente similar al formado entre las hendiduras de la red.

10 El espesor de la capa dieléctrica puede ser lo suficientemente fino como para no dejar nada más que un solo modo guiado en la capa dieléctrica con la citada al menos una longitud de onda central.

Alternativamente, el espesor de la capa dieléctrica es lo suficientemente grueso como para permitir la propagación de varios modos guiados en la capa dieléctrica, permitiendo la realización de un filtro que presenta varias longitudes de onda centrales de transmisión.

15 Según un ejemplo, el material que forma la capa dieléctrica comprende uno de los materiales elegidos entre el nitruro de silicio, el carburo de silicio, el óxido de silicio, el fluoruro de itrio, el sulfuro de zinc, el óxido de aluminio o de magnesio.

Según un ejemplo, el material que forma la red comprende uno de los materiales elegidos entre el oro, el aluminio, el cobre, el tungsteno, el níquel, el platino la plata.

Según un ejemplo, la longitud de onda central está comprendida entre sensiblemente $0,850\mu\text{m}$ y $30\mu\text{m}$.

20 Según una variante, el filtro espectral comprende además un sustrato, estando suspendido el conjunto capa dieléctrica y red metálica en el perímetro de un orificio formado en el citado sustrato.

25 Según un segundo aspecto, el invento se refiere a una matriz espectral que comprende un conjunto de filtros espectrales según el primer aspecto, estando acopladas las redes de los citados filtros con la misma capa de material dieléctrico, estando suspendido el conjunto capa dieléctrica y redes metálicas en el perímetro de un orificio formado en un mismo sustrato.

Según un tercer aspecto, el invento se refiere a un sistema oprónico de detección próximo al infrarrojo o en infrarrojo que comprende un detector y un filtro espectral según el primer aspecto o una matriz multiespectral según el segundo aspecto.

30 Según una variante, el sistema oprónico de detección comprende además un polarizador que permite polarizar una onda incidente según una dirección paralela a una de las direcciones de las hendiduras de las o al menos una de la(s) red(es) eléctrica(s).

Según un cuarto aspecto, el invento se refiere a un método de fabricación de un dispositivo de filtrado según el primero o el segundo aspecto, que comprende:

35 - el depósito sobre una de las capas de un sustrato de una capa de sílice y sobre la otra cara del sustrato de una capa fina de dieléctrico para formar la guía de onda,

- el depósito de la(s) red(es) metálica(s) sobre la citada capa de material dieléctrico según un motivo dado,

40 - la grabación con sílice en la cara trasera del sustrato según un motivo definido por litografía UV o electrónica, alineado con el motivo de la(s) red(es) eléctrica(s) formada(s) en la cara delantera, y a continuación la grabación del sustrato con silicio en ambas caras, según el motivo anterior, con el fin de obtener una membrana suspendida formada por la capa de dieléctrico y por la(s) red(es).

Según una primera variante, el depósito de la(s) red(es) metálica(s) se obtiene por litografía UV o por electrónica.

Según una segunda variante, el depósito de la(s) red(es) metálica(s) se obtiene por nabo-impresión.

Cuando la capa de material dieléctrico es estructurada, la grabación de la citada capa puede obtenerse igualmente por litografía UV o por electrónica, o por nano-impresión.

45 Breve descripción de los dibujos.

Otras ventajas y características del invento aparecerán con la lectura de l descripción, ilustrada con las siguientes figuras:

Figuras 1A y 1B, un esquema que ilustra el principio de un filtro de ancho de banda según el invento y una variante de tal filtro;

Figuras 2A a 2C, tres ejemplos de realización de un filtro de ancho de banda según el invento;

Figura 3, unas curvas que muestran la respuesta espectral calculada para un filtro de ancho de banda del tipo de la figura 2A, para diferentes valores del periodo y de la anchura de las hendiduras;

Figuras 4A, 4B de los ejemplos de utilización de un filtro de ancho de banda del tipo de la figura 2C;

5 Figuras 5A, 5B de unos ejemplos de redes de dos dimensiones que presentan unos motivos respectivamente hexagonales y en forma de paralelogramo;

Figura 6, un esquema de un ejemplo de matriz multispectral que comprende una pluralidad de filtros de ancho de banda según el invento;

Figura 7, un esquema que muestra una disposición de las redes en un ejemplo de matriz multispectral;

10 Figura 8, un esquema que muestra un sistema de detección óptica que integra un filtro espectral según el invento:

Descripción detallada

15 La figura 1A ilustra mediante un esquema el principio de un ejemplo de filtro de ancho de banda 100 según el invento (visto en corte) mientras que las figuras 2^a a 2C representan vistas en perspectiva de diferentes ejemplos de realización. El filtro 100 comprende una fina capa 102 de material dieléctrico sobre la que está depositada una película metálica 101 perforada periódicamente, en una o varias direcciones, con un motivo 103 sub-longitud de onda, estando suspendido al mismo tiempo, es decir no depositado sobre un sustrato salvo en unas zonas en las que no se busca la funcionalidad del filtrado espectral. Por ejemplo, el conjunto película y capa dieléctrica está suspendido en el perímetro de un orificio formado en un sustrato (no representado en la figura 1A). Durante la utilización, la estructura está por lo tanto sumergida en el medio ambiente (vacío o cualquier fluido). La capa 102 es de material dieléctrico transparente en la banda espectral en la que se busca transmitir, por ejemplo de nitruro de silicio o de carburo de silicio. Se pueden utilizar otros materiales como por ejemplo el óxido de silicio, el fluoruro de itrio, el sulfuro de zinc, el óxido de aluminio o de magnesio. La película metálica es por ejemplo de oro, de aluminio, de cobre, de tungsteno, de níquel, de platino o de plata, pudiendo hacerse la elección del metal con el fin de minimizar la absorción en la gama espectral de utilización. El motivo elemental 103 que se repite de manera periódica o casi periódica (es decir con un periodo de variación lenta) puede comprender una o varias hendiduras estrechas que se estiran a ambos lados del motivo. La red puede comprender un conjunto de hendiduras paralelas (es el caso por ejemplo de la figura 2A) o dos o más conjuntos de hendiduras paralelas (es el caso por ejemplo de las figuras 2B y 2C para dos conjuntos de hendiduras).

30 El principio del filtro se basa en el confinamiento de una onda incidente 1 (figura 1A) en la capa dieléctrica 102 que sirve de guía de onda, a continuación en su transmisión al espacio de salida (onda de salida referenciada con un 7 en la figura 1A). El atrape y a continuación la transmisión se obtienen gracias a la estructura difractante metálica 101 depositada sobre una de las caras de la guía de onda 102, estando por otra parte la citada estructura adaptada para el control de la polarización como será descrito a continuación. De una manera más precisa, los fotones incidentes (simbolizados con la flecha 1) son transmitidos en la capa 102 de material dieléctrico por difracción a través de la red metálica 101. Esta difracción puede hacerse con la orden 0 +/- 1, etc. Los depositantes han mostrado que al elegir los parámetros optogeométricos de la estructura difractante de tal manera que en la gama espectral del filtro, solo las órdenes 0 y +/- 1 de una onda de incidencia normal sean difractados, se podía obtener una excelente selectividad. En efecto, mientras que los fotones difractados con la orden 0 (simbolizados con la flecha 2), con una incidencia normal con respecto al plano de guía de la onda, son transmitidos parcialmente fuera de la capa dieléctrica (flecha 7) y reflejados parcialmente siempre con una incidencia normal (6, 8) para ser difractados nuevamente bajo la red (flechas 9, 10), las órdenes +/- 1 (indicadas por las flechas 3, 4) son guiadas en la capa 102, especialmente por reflexión total (flecha 5), y no pueden volver a salir más que por difracción bajo la red (flechas 11, 12). Gracias a las interferencias constructivas de los fotones emergentes 7, aparecerán picos de transmisión para ciertas longitudes de onda. Típicamente, para limitar la difracción y la propagación de las órdenes 0 y +/- 1, el periodo d de la estructura difractante puede elegirse de tal manera que $d < \lambda_0 < n_g d$, en donde λ_0 es la longitud de onda central de la banda espectral que se trata de filtrar, típicamente entre 0,850 μm y 30 μm para las aplicaciones en el infrarrojo cercano e infrarrojo, y n_g es el índice del material dieléctrico medido en esta longitud de onda. Por otra parte, al estar suspendido el conjunto red metálica y capa dieléctrica, es decir emergido en su utilización en el medio ambiente, por ejemplo en el vacío o en otro fluido con un índice próximo al 1, la elección del material dieléctrico para obtener la condición de reflexión total en el interfaz dieléctrico / medio ambiente se facilita y las reflexiones parásitas relacionadas con la presencia de un sustrato eliminadas, permitiendo hacer máximo el flujo luminoso emitido en el espacio libre.

55 Según una variante ilustrada por ejemplo en la figura 1B, la capa de material dieléctrico puede ser estructurada según un motivo similar al de las hendiduras que forman la red (por un lado y por otro de la capa de dieléctrico). Los depositantes han demostrado que se obtenía una eficacia creciente.

Los depositantes han demostrado por otra parte que al elegir a la vez un espesor de la red metálica suficientemente grande y unas hendiduras suficientemente estrechas, solo la polarización TM (campo magnético paralelo a las hendiduras) podía ser transmitida en la fina capa y después en el espacio libre, permitiendo un perfecto control de la polarización una vez ajustada la orientación de los conjuntos de las hendiduras paralelas. Típicamente, eligiendo un espesor t de la red tal que $t > \lambda_0 / 50$ y una anchura w de las hendiduras tal que $w < \lambda_0 / 10$. Los depositantes han demostrado que se podía obtener una transmisión polarizada TE residual (campo eléctrico paralelo a las hendiduras) inferior a 5% de la luz incidente en un dispositivo de filtrado de ancho de banda tal como el descrito anteriormente.

Ventajosamente, el espesor t de la red es elegido inferior a $\lambda_0 / 10$ para evitar posibles fenómenos de resonancias verticales en las hendiduras de la red que tendrían un efecto perturbador en la transmisión global del filtro.

Las figuras 2A a 2C representan tres ejemplos de instalación para obtener filtros de ancho de banda con polarización controlada.

La estructura de la figura 2A se llama "configuración con una dimensión polarizante". Es este ejemplo, la estructura difractante metálica está formada por un conjunto de hendiduras paralelas muy finas, que permiten polarizar la onda transmitida en modo TM. De esta manera, para una onda incidente policromática y no polarizada, formada por una combinación de fotones incidentes polarizados TM (campo magnético perpendicular al plano de corte de la figura) y de fotones polarizados TE (campo eléctrico perpendicular al plano de corte de la figura), solo los fotones polarizados TM con la longitud de onda central λ_0 son transmitidos por el filtro. Esta configuración puede permitir además de la función de filtrado, un análisis de la polarización de la onda incidente, por ejemplo previendo unos medios de rotación del filtro o disponiendo de un conjunto de filtros que representan unas redes cuyos hendiduras no están orientadas en la misma dirección, por ejemplo bajo la forma de una matriz multiespectral tal como será descrita a continuación. Si la onda incidente comprende una componente con una polarización lineal mayoritaria, lo que es el caso por ejemplo de una radiación infrarroja emitida o reflejada por un objeto artificial (del tipo de un vehículo o un edificio, por ejemplo), la señal medida a la salida del filtro será variable con la posición del filtro o según el filtro en el caso de una matriz multiespectral. Si la onda incidente está simplemente no polarizada (típicamente el caso de una radiación infrarroja emitida por un objeto natural, tipo vegetación), la señal a la salida del filtro será constante cualquiera que sea la posición del filtro o cualquiera que sea el filtro en el caso de una matriz multiespectral. Por lo tanto así es posible hacer el análisis de la polarización de una escena.

Según una variante, las hendiduras están espaciadas de manera casi periódica, es decir con un periodo de variación lenta. En efecto, parece que la función de filtrado es eficaz cuando el número de repeticiones de las hendiduras es al menos igual al factor de calidad del filtro, definido como la relación entre la longitud de onda central de transmisión y la anchura espectral a media altura. Así típicamente, para un filtro adaptado a la transmisión a $6\mu\text{m}$ y con una anchura espectral a media altura de $0,2\mu\text{m}$, se tratará de disponer según la dirección de periodicidad de al menos treinta hendiduras. Los depositantes han demostrado que si el periodo varía lentamente, es decir con un valor inferior sensiblemente a la anchura espectral a media altura para un número de hendiduras sensiblemente igual al factor de calidad, se podía conservar la función de filtrado haciendo correr al mismo tiempo la longitud de onda de transmisión. Por ejemplo, la variación del periodo puede ser una función lineal de la distancia, según la dirección de periodicidad del motivo. Entonces es posible realizar por ejemplo para una función de espectro-reproductor de imágenes, un filtro cuya longitud de onda de transmisión λ_0 varíe continuamente de un extremo a otro del filtro, cubriendo toda una gama espectral.

La estructura de la figura 2B se llama "configuración con dos direcciones no polarizantes". En este ejemplo, por el contrario, el filtro de ancho de banda se ha hecho puramente no polarizante gracias a una estructura difractante perfectamente simétrica. De esta manera, los fotones incidentes con la longitud de onda λ_0 son transmitidos cualquiera que sea su polarización. Como consecuencia, las hendiduras de la estructura difractante están cruzadas, formando dos conjuntos de hendiduras dispuestas según dos direcciones ventajosamente perpendiculares, y el periodo es idéntico según las dos direcciones. La insensibilidad con la polarización en este ejemplo resulta como anteriormente de las condiciones de espesor de la red metálica y de la finura de las hendiduras, permitiendo en cada una de las direcciones, un perfecto control de la polarización. Tal estructura permite especialmente transmitir la casi totalidad del flujo incidente, lo que puede ser un parámetro importante en el caso de una aplicación a la detección, cuando se busca devolver la señal de detección máxima.

La estructura de la figura 2C se llama "configuración con dos dimensiones polarizantes". Como en el ejemplo de la figura 2B, las hendiduras están cruzadas y las condiciones de espesor de la red y de finura de las hendiduras son respetadas para tener según cada una de las direcciones un perfecto control de la polarización. En este ejemplo sin embargo, los periodos según una y otra de las direcciones son diferentes (respectivamente d_1 y d_2) permitiendo una función de filtrado según dos bandas espectrales respectivamente centradas en dos longitudes de onda λ_{01} y λ_{02} distintas. De esta manera, el filtro obtenido es polarizante y la longitud de onda filtrada depende de la polarización. En efecto, solo los fotones incidentes polarizados TM (campo magnético perpendicular al plano de corte de la figura) y que presentan una longitud de onda próxima a λ_{01} serán transmitidos por el filtro así como los fotones incidentes polarizados TE (campo eléctrico perpendicular al plano de corte de la figura) y que presentan una longitud de onda próxima a λ_{02} . Un filtrado ajustable en longitud de onda puede realizarse por ejemplo seleccionando la polarización

de la onda incidente, como será descrito a continuación. Igualmente son posibles aplicaciones de análisis de la polarización como las descritas en el caso de un filtro con una dimensión polarizante.

La figura 3 ilustra las respuestas espectrales en transmisión de un filtro del tipo de la figura 2A, calculada para diferentes valores del periodo d y de la anchura de las hendiduras w . El filtro está formado por un guía de onda de espesor h y de índice óptico n_g supuesto igual a 2 sobre el cual está depositada y perforada periódicamente según una sola dirección de las hendiduras, una película metálica de índice óptico igual al del oro (véase "Handbooks of optical constants of solids", ED Palik, 1985). Los cálculos se han efectuado utilizando la lógica del Reticolo, desarrollada por J. P. Hugonin y P. Lalanne ("Reticolo software for grating analysis", Institut d'Optique, Orsay, France (2005)), y basado en la teoría de las ondas acopladas (o RCWA según la abreviatura de la expresión anglosajona "Rigorous Coupled Wave Analysis"). La figura 3 presenta tres espectros de transmisión, referenciados respectivamente 301, 302 y 303, calculados con una incidencia normal en polarización TM para unas longitudes de onda incidentes que varían entre $3 \mu\text{m}$ y $12 \mu\text{m}$, para tres estructuras de geometría diferentes. El espesor de la capa fina de dieléctrico es $h = 1,3 \mu\text{m}$ y el espesor de la red $t = 0,2 \mu\text{m}$ para las tres geometrías. El motivo elemental está formado por una hendidura de anchura w igual a $0,25 \mu\text{m}$, $0,3 \mu\text{m}$ y $0,35 \mu\text{m}$ respectivamente para las curvas 301, 302 y 303. El periodo de repetición del motivo es $d = 4 \mu\text{m}$, $4,5 \mu\text{m}$ y $5 \mu\text{m}$ respectivamente para las curvas 301, 302 y 303. Las simulaciones muestran un valor de transmisión próximo a 0,7 con una longitud de onda central, correspondiente al valor de la longitud de onda para la cual la transmisión es máxima, que se desplaza de $6,225 \mu\text{m}$ (curva 301), a $6,725 \mu\text{m}$ (curva 302) y a $7,055 \mu\text{m}$ (curva 303), La anchura del pico a media altura varía de 140 nm (curva 301), a 185 nm (curva 302) y a 230 nm (curva 303). Con referencia a la figura 1A y a la descripción del principio físico, se puede explicar el alcance de estos espectros dividiendo la banda espectral en una escala con tres zonas (zona 1, zona 2a, zona 2b). En la figura 3, la escala superior corresponde a la curva 301, ($d=4 \mu\text{m}$, $w= 0,25 \mu\text{m}$), la escala de en medio corresponde a la curva 302 ($d= 4,5 \mu\text{m}$, $w= 0,3 \mu\text{m}$), y la escala inferior corresponde a la curva 303 ($d= 5 \mu\text{m}$, $w= 0,35 \mu\text{m}$). La zona 1 corresponde a la zona de las longitudes de onda inferiores al periodo ($\lambda < d$). Para esta zona, la estructura difracta varios órdenes y la intensidad en el orden 0 es débil. La zona 2 se sub-divide en dos zonas, (zona 2a y zona 2b) a ambos lados de una longitud de onda crítica λ_c , cuya expresión está dada por la ley de las redes. Con una incidencia normal, $\lambda_c = ng d$, en donde ng es el índice del material dieléctrico que forma la guía de onda (para los cálculos de redes véase por ejemplo J.D. Jackson, "Electrodynamique classique- 3ª edición" Dunod (2001)). En la zona 2a ($\lambda < \lambda_c$) la red difracta en el dieléctrico las ordenes 0 y ± 1 , Como ya se ha explicado en referencia a la figura 1A, las ondas difractadas según el orden ± 1 son guiadas y no salen de la guía nada más que con la condición de ser de nuevo con incidencia normal. Esto se produce durante la difracción con reflexión bajo la red. Para ciertas longitudes de onda, las ondas interfieren constructivamente formando así el pico de transmisión a la longitud de onda central λ_0 donde se demuestra que está fuertemente ligada con el periodo de la red. En la zona 2b ($\lambda > \lambda_c$), no hay difracción en la guía de onda nada más que de orden 0. No hay pues atrape para la guía de onda, impidiendo una transmisión importante.

En el ejemplo de la figura 3, el espesor y el índice de la capa dieléctrica son tales que no hay nada más que un solo modo guiado en la zona espectral del filtro, permitiendo una muy buena selectividad alrededor de una longitud de onda central única. Esta propiedad se verifica si se verifica la condición:

$$h < \frac{\lambda}{2\sqrt{n_g^2 - n_{ext}^2}}$$

en donde h es el espesor de la capa de dieléctrico, n_g el índice de la guía y n_{ext} el índice de refracción del medio ambiente. Esto da como resultado una respuesta espectral en transmisión que presenta un solo pico.

Al aumentar el espesor de la capa de dieléctrico, se permite por el contrario la propagación de varios modos guiados y como consecuencia la posibilidad de varios picos de transmisión.

En el ejemplo que acabamos de describir, debido al espesor de la red metálica y a la finura de las hendiduras, solo puede transmitirse la polarización TM. Por otra parte, el atrape en la guía en tal estructura es particularmente eficaz debido a la naturaleza metálica de la red y a la finura de las hendiduras. La polarización TE es en lo que a ella se refiere mayoritariamente reflejada cualquiera que sea la longitud de onda. Estos espectros pueden ser generalizados a una onda incidente no polarizada para una estructura que tiene las hendiduras cruzadas ("configuración con dos direcciones no polarizadas" del tipo de la figura 2B). Las diferentes geometrías pueden combinarse en una o en otra dirección del plano de la estructura para obtener una configuración con dos dimensiones polarizantes (figura 2C). De esta manera, el depositante ha demostrado que las propiedades de los fotones atrapados en la guía (longitud de onda, polarización) están relacionadas directamente con los parámetros optogeométricos de la estructura tales como el espesor y la naturaleza de la película metálica, la forma, la dimensión de la periodicidad de las características, el espesor y la naturaleza de la guía de onda. Las características espectrales del filtro de ancho de banda según el invento pueden pues ser ajustadas haciendo variar los parámetros anteriores.

Las curvas calculadas en el ejemplo descrito en la figura 3 hacen la hipótesis de una onda incidente con incidencia normal. Según una variante, es posible trabajar con una incidencia no nula, lo que tendrá como efecto desplazar el pico de transmisión si el ángulo de incidencia definido con respecto a la normal del plano de la red permanece pequeño, no siendo ya las condiciones de interferencia constructivas, las mismas. Si el ángulo de incidencia aumenta, se observará un desdoblamiento del pico de transmisión, en detrimento de la selectividad del filtro.

Las figuras 4A y 4B muestran un ejemplo de aplicación de un filtro de ancho de banda del tipo de la figura 2C. Se trata de un dispositivo de filtrado que comprende un filtro de ancho de banda 100 del tipo de la figura 2C, es decir una configuración con dos direcciones polarizantes, estando dispuestas las hendiduras según una primera y una segunda dirección con unos periodos d_1 y d_2 diferentes. En el ejemplo de la figura 4A está previsto un polarizador 401 que permite polarizar en modo TM una onda incidente sobre el filtro (campo magnético perpendicular al plano de corte de la figura). La ventana espectral transmitida está centrada pues sobre λ_{01} correspondiente a la red de periodo d_1 . En el ejemplo de la figura 4B, el polarizador 401 está adaptado para polarizar en modo TE la onda incidente sobre el filtro (campo eléctrico perpendicular al plano de corte de la figura). La ventana espectral transmitida está centrada entonces sobre λ_{02} correspondiente a la red de periodo d_2 . Es pues posible con tal dispositivo seleccionar una u otra de las ventanas espectrales seleccionando la polarización.

Las figuras 5A y 5B ilustran dos ejemplos de realización de filtros espectrales según el invento en los cuales las redes comprenden una pluralidad de conjuntos de hendiduras, sensiblemente idénticas, paralelas estando dispuestas las hendiduras de cada uno de los conjuntos según tres direcciones diferentes (D_1 , D_2 , D_3) para formar un motivo 50 hexagonal (figura 5A) o en forma de paralelogramo (figura 5B) repetida según dos direcciones Δ_1 , Δ_2 . El motivo se repite de forma periódica o casi periódica según cada una de las direcciones Δ_1 , Δ_2 . Una ventaja de esta estructura es la de limitar el efecto de la incidencia de la onda sobre el filtro conservando al mismo tiempo una pequeña sensibilidad a la polarización.

La figura 6 muestra un ejemplo de tal realización de un dispositivo de filtrado que comprende varios filtros de ancho de banda que forman un mosaico de filtros, o matriz multispectral. El conjunto capa dieléctrica 602 y redes metálicas referenciadas 101A a 101D de los filtros está suspendido en el contorno de un orificio formado en un mismo sustrato 601, por ejemplo de sílice. En este ejemplo, el mosaico comprende unos filtros con una dimensión polarizante (101B, 101D) con unos periodos diferentes y como consecuencia unas longitudes de onda de filtrado diferentes así como unos filtros con dos direcciones polarizantes o no polarizantes (101A, 101C). Este tipo de dispositivo, integrado en un sistema de imagenaría, permite por ejemplo aplicaciones de imagenaría o de espectrometría, o de análisis de la polarización. Por otra parte, el mosaico de filtros así obtenido no presenta superespesor de un filtro a otro, como habría sido el caso para un mosaico de filtros interferenciales por ejemplo, resultando o no la longitud de onda central de filtrado de parámetros optogeométricos de la red, de un apilado más o menos importante de capas.

La figura 7 representa una vista desde arriba de una matriz multispectral 600 según un ejemplo de realización. En este ejemplo, la matriz comprende un conjunto de filtros cuyas redes 101A a 101D comprenden cada una un único conjunto de hendiduras paralelas, de periodo idéntico, pero cuya orientación de las hendiduras varía de un filtro a otro, por ejemplo 0° , 30° , 60° , 90° . Esta matriz permite por ejemplo un análisis de la polarización de una escena, previendo unos medios para desplazarla delante del dispositivo de detección.

Un dispositivo de filtrado según el invento puede fabricarse con distintos procedimientos. Ventajosamente, se realiza adaptando el procedimiento descrito en G. Vincent et al. "Large Area dielectric and metallic freestanding gratings for midinfrared optical filtering applications", J. Vac. Sci. Technol. B26, 1852 (2008) que permite la realización de estructuras suspendidas. Se selecciona un sustrato de silicio por ejemplo, de silicio pulido de doble cara con orientación cristalina 100 y a continuación se deposita sobre una de las caras del sustrato ("cara trasera") una capa de sílice (típicamente 500 nm) por ejemplo, por PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) o por pulverización. Sobre la otra cara del sustrato ("cara delantera"), se deposita una capa fina de dieléctrico para formar la guía de onda (se trata por ejemplo de una capa de nitruro de silicio depositada por PECVD). Se puede realizar una etapa de ajuste de los esfuerzos mecánicos en la capa fina que forma la guía de onda procediendo a unos recocidos (típicamente una hora a 400° C para el nitruro depositado por PECVD). La red metálica se deposita entonces sobre la guía de onda. Esta etapa comprende por ejemplo el depósito de una resina sensible a la radiación UV (por ejemplo, AZ 5214 de MicroChemical) o a los electrones (por ejemplo, de PMMA), de la litografía UV o electrónica del motivo deseado (red de hendiduras 1D ó 2D, etc.), del desarrollo de la resina aislada del depósito de metal, por ejemplo, de oro, según el espesor deseado, y finalmente el lift-off (eliminación de la resina o del metal no deseado) en un disolvente adaptado, por ejemplo acetona para la resina AZ5214 o tricoretileno para la PMMA. Según una variante, puede utilizarse una tecnología de nano-impresión (o "nanoimprint") para formar la red metálica en lugar de la litografía electrónica por ejemplo, pudiendo hacerse la tecnología de nano-impresión con menor coste. La membrana suspendida se obtiene a continuación por depósito sobre la cara trasera de una resina sensible a la radiación UV (por ejemplo AZ5214) o a los electrones (por ejemplo PMMA), de la litografía UV o electrónica del motivo deseado (abertura cuadrada, rectangular, etc.) poniendo atención en que esté alineado con el motivo de la cara delantera, del desarrollo de la resina aislada, la grabación de la sílice que ha quedado libre después del desarrollo, y con la ayuda de una solución a base de ácido fluorhídrico (en esta zona la sílice deja lugar al silicio), la retirada de la resina por un disolvente adaptado, el paso de la muestra por una solución de TMAH (hidróxido de tetrametilamonio) con el fin de grabar el sustrato de silicio.

Según una variante, en el caso en el que la capa de dieléctrico esté estructurada (tal como está ilustrado en el ejemplo de la figura 1B) se procede a continuación a la grabación de la citada capa, por ejemplo mediante grabación por plasma.

5 El procedimiento así descrito permite realizar un filtro de ancho de banda único, o un mosaico de filtros tal como el descrito por ejemplo en la figura 6. Los filtros de mosaico pueden realizarse entonces por el procedimiento descrito sobre el mismo sustrato, también de una manera sencilla y sin ningún sobre costo notable con respecto a un filtro único, siendo modificada solamente la etapa de definición del motivo.

10 La figura 8 representa de manera esquemática un sistema oprónico de detección que utiliza un filtro espectral o una matriz multiespectral 600 tal como la descrita anteriormente, y que comprende un conjunto de filtros espectrales referenciados 100_A a 100_D, siendo utilizados los filtros en transmisión. El sistema comprende generalmente un objetivo 801 y un detector 802 adaptado a la banda espectral de interés. La matriz 600 está posicionada delante del detector y puede preverse unos medios (no representados) para desplazarla, permitiendo de esta manera trabajar con uno u otro de los filtros, por ejemplo en una aplicación de análisis de la polarización. Según una variante, un polarizador 803 está situado en el sistema para seleccionar una polarización y seleccionar de esta manera una longitud de onda central de transmisión como la que ha sido descrita anteriormente por ejemplo en el ejemplo de las figuras 4A, 4B. Alternativamente, el sistema óptico puede comprender una yuxtaposición de objetivos, cada uno de ellos de cara a un filtro de la matriz 600 y a una zona de la matriz de detección 802 de dimensiones superiores a la de la representada en la figura 8. Según esta variante, la matriz 600 permanece fija en el sistema.

20 A pesar de que ha sido descrita a través de un cierto número de ejemplos de realización detallados, la estructura y el método de realización del filtro espectral según el invento comprenden diferentes variantes, modificaciones y perfeccionamientos que aparecerán de manera evidente con el experto, bien entendido que estas diferentes variantes, modificaciones y perfeccionamientos forman parte del alcance del invento, tal como está definido en las reivindicaciones que siguen.

REIVINDICACIONES

1. Filtro espectral de ancho de banda (100), optimizado para la transmisión de una onda incidente con al menos una primera longitud de onda central λ_0 dada, caracterizado porque comprende.
 - 5 - una red metálica (101) de espesor (t) superior a alrededor de $\lambda_0/50$ y que comprende al menos un primer conjunto de hendiduras sensiblemente idénticas, paralelas, de anchura (w) inferior a alrededor de $\lambda_0/10$, espaciadas de manera periódica o casi periódica según un primer periodo (d, d_1) inferior a la citada primera longitud de onda central,
 - 10 - una capa de material dieléctrico (102) de espesor (h) e índice de refracción (n_g) dados, acoplado con la red metálica para formar una guía de ondas de las ondas difractadas por la red, estando adaptado el primer periodo de la red para que solo las órdenes 0 y +/- 1 de una onda con incidencia normal y longitud de onda λ_0 sean difractadas en la capa de material dieléctrico y estando suspendida la red en un fluido de índice de refracción próximo a 1.
2. Filtro espectral según la reivindicación 1, en el cual la red metálica comprende un segundo conjunto de hendiduras, sensiblemente idénticas, paralelas, espaciadas de manera periódica o casi periódica según un segundo periodo (d_2), estando situadas las hendiduras del segundo conjunto según una dirección diferente de la de las hendiduras del primer conjunto.
 - 15 3. Filtro espectral según la reivindicación 2, en el cual la anchura de las hendiduras del segundo conjunto de hendiduras es sensiblemente idéntico a la de las hendiduras del primer conjunto de hendiduras y los dos periodos son idénticos.
 - 20 4. Filtro espectral según la reivindicación 2, optimizado para el filtrado de una onda incidente con al menos una primera y una segunda longitudes de onda centrales λ_{01} , λ_{02} en el cual los dos periodos son diferentes, inferiores a las primera y segunda longitudes de onda respectivamente, estando adaptado el periodo según cada una de las dimensiones para que solo las órdenes 0 y 1 de una onda con incidencia normal y longitud de onda λ_{01} ó λ_{02} respectivamente sean difractadas en la capa de material dieléctrico.
 - 25 5. Filtro espectral según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, en el cual las hendiduras de los citados primero y segundo conjuntos de hendiduras son perpendiculares.
 - 6. Filtro espectral según la reivindicación 1, en el cual la red metálica comprende una pluralidad de conjuntos de hendiduras, sensiblemente idénticas, paralelas, espaciadas de manera periódica casi periódica, estando situadas las hendiduras de cada uno de los conjuntos según unas direcciones (D_1 , D_2 , D_3) diferentes para formar un motivo (50) repetido según dos direcciones (Δ_1 , Δ_2).
 - 30 7. Filtro espectral según la reivindicación 1, en el cual el citado motivo (50) es hexagonal o en forma de paralelogramo.
 - 8. Filtro espectral según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el cual la capa de material dieléctrico (102) está estructurada según un motivo sensiblemente similar al formado entre las hendiduras de la red.
 - 35 9. Filtro espectral según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el cual el espesor (h) de la capa dieléctrica es lo suficientemente fino como para no dejar pasar nada más que un solo modo guiado en la capa dieléctrica con la citada al menos primera longitud de onda central.
 - 10. Filtro espectral según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el cual el espesor de la capa dieléctrica es lo suficientemente grueso como para permitir la propagación de varios modos guiados en la capa dieléctrica.
 - 40 11. Filtro espectral según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el cual el material que forma la capa dieléctrica comprende uno de los materiales elegidos entre el nitruro de silicio, el carburo de silicio, el óxido de silicio, el fluoruro de itrio, el sulfuro de zinc, el óxido de aluminio o de magnesio.
 - 12. Filtro espectral según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el cual el material que forma la red comprende uno de los metales elegidos entre el oro, el aluminio, el cobre, el tungsteno, el níquel, el platino, la plata.
 - 45 13. Filtro espectral según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el cual la citada al menos primera longitud de onda central está comprendida entre sensiblemente $0,850 \mu\text{m}$ y $30 \mu\text{m}$.
 - 14. Filtro espectral según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además un sustrato, estando suspendido el conjunto de la capa dieléctrica y la red metálica en el contorno de un orificio formado en el citado sustrato.
 - 50 15. Matriz multiespectral (600) que comprende un conjunto de filtros espectrales según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, estando acopladas las redes (101_A, 101_B, 101_C, 101_D) de los citados filtros espectrales con la misma capa (102) de material dieléctrico, estando suspendido el conjunto capa dieléctrica y redes metálicas en el contorno de un orificio formado en el citado sustrato (601).

16. Sistema optónico (800) de detección en el infrarrojo cercano o en el infrarrojo que comprende un detector (802) y un filtro espectral según la reivindicación 14 o una matriz espectral (600) según la reivindicación 15.
17. Sistema optónico de detección según la reivindicación 16, que comprende además un polarizador (803) que permite polarizar una onda incidente según una dirección paralela a una de las direcciones de las hendiduras de las o al menos una de las red(es) metálica(s) del o de los filtro(s).
- 5
18. Método de fabricación de un filtro espectral según la reivindicación 14 o de una matriz multiespectral según la reivindicación 15 que comprende:
- el depósito sobre una de las caras de un sustrato de una capa de sílice y sobre la otra cara del sustrato de una fina capa de dieléctrico para formar la guía de onda,
- 10
- el depósito de o de la(s) red(es) metálica(s) sobre la citada capa de material dieléctrico según un motivo dado,
 - la grabación de la sílice en la cara trasera del sustrato según un motivo definido por litografía UV o electrónica, alineado con el motivo de o de las red(es) metálica(s) formado(s) en la cara delantera, y a continuación la grabación del sustrato de silicio a ambos lados, según el motivo precedente, con el fin de obtener una membrana suspendida formada de la capa dieléctrica y de o de las red(es).
- 15
19. Método de fabricación según la reivindicación 18, en el cual el depósito de la o de las red(es) metálica(s) se obtiene por litografía UV o por electrónica.
20. Método de fabricación según la reivindicación 18, en el cual el depósito de la o de las red(es) metálica(s) se obtiene por nano-impresión.

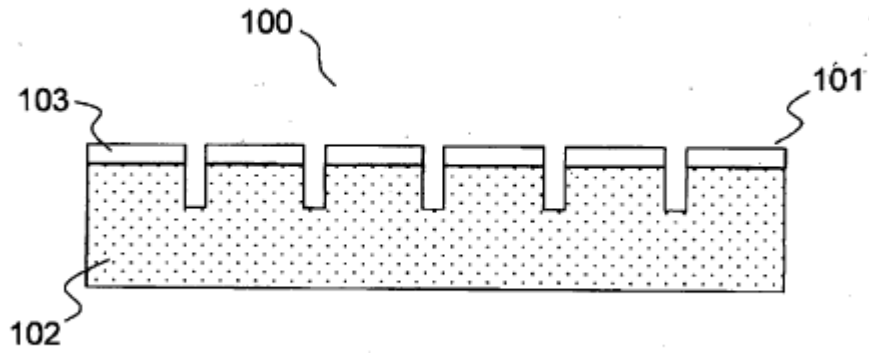


FIG. 1B

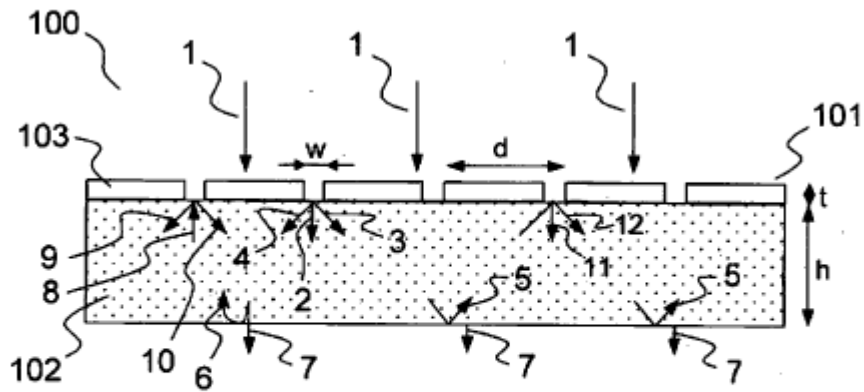
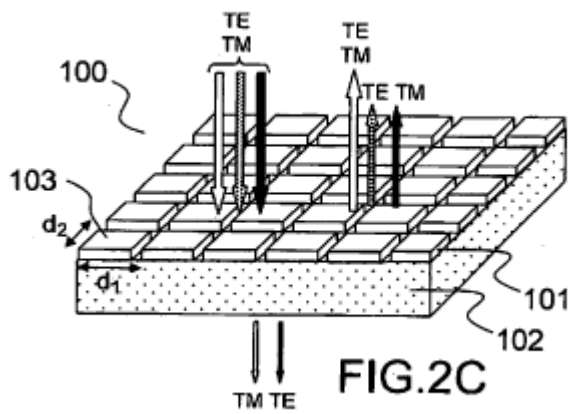
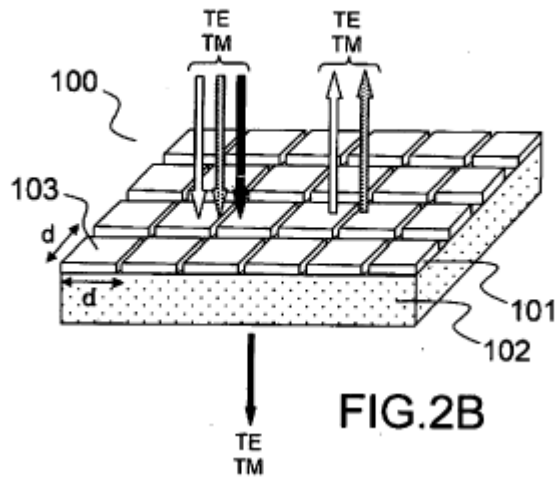
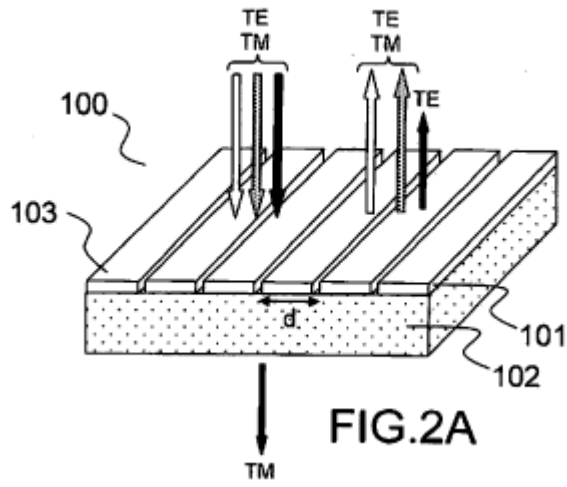


FIG. 1A



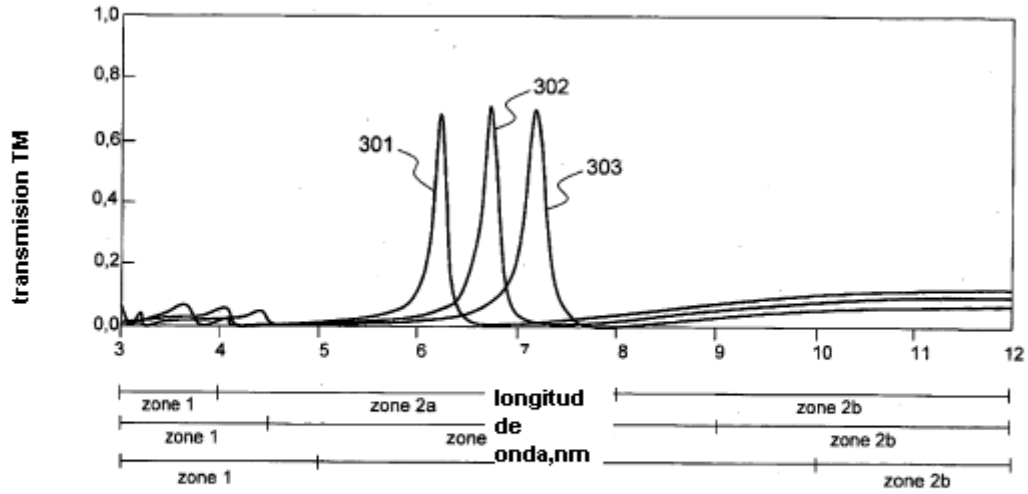


FIG.3

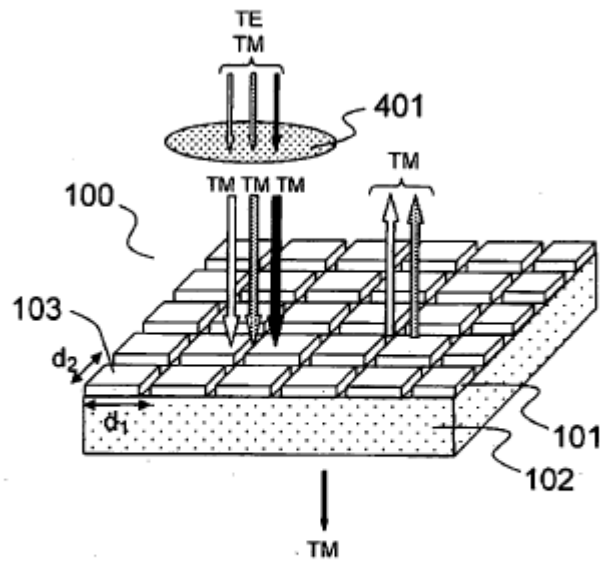


FIG.4A

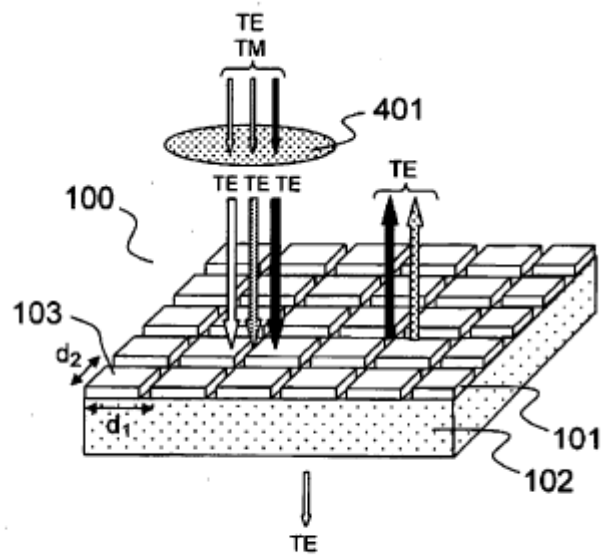


FIG.4B

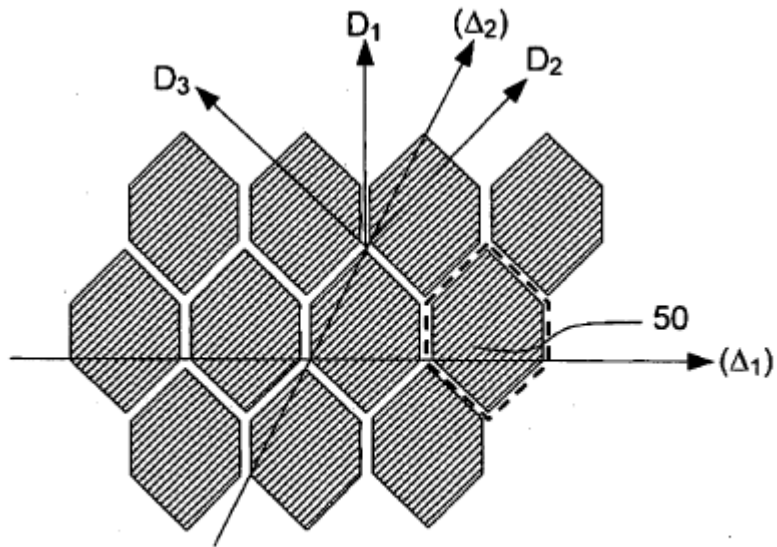


FIG.5A

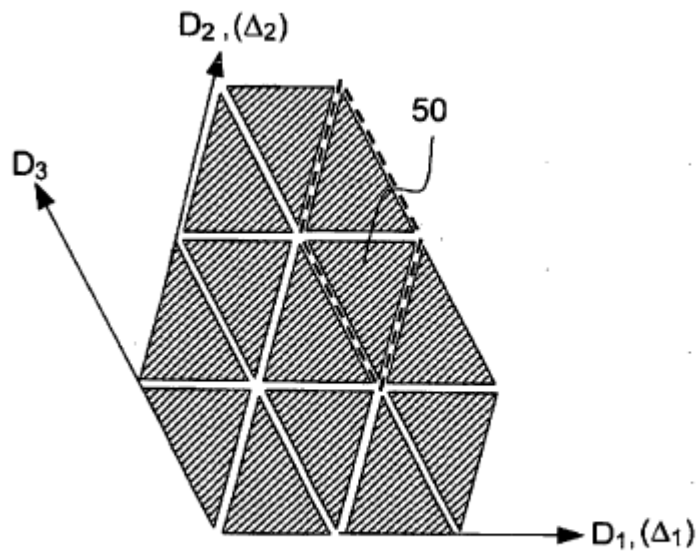


FIG.5B

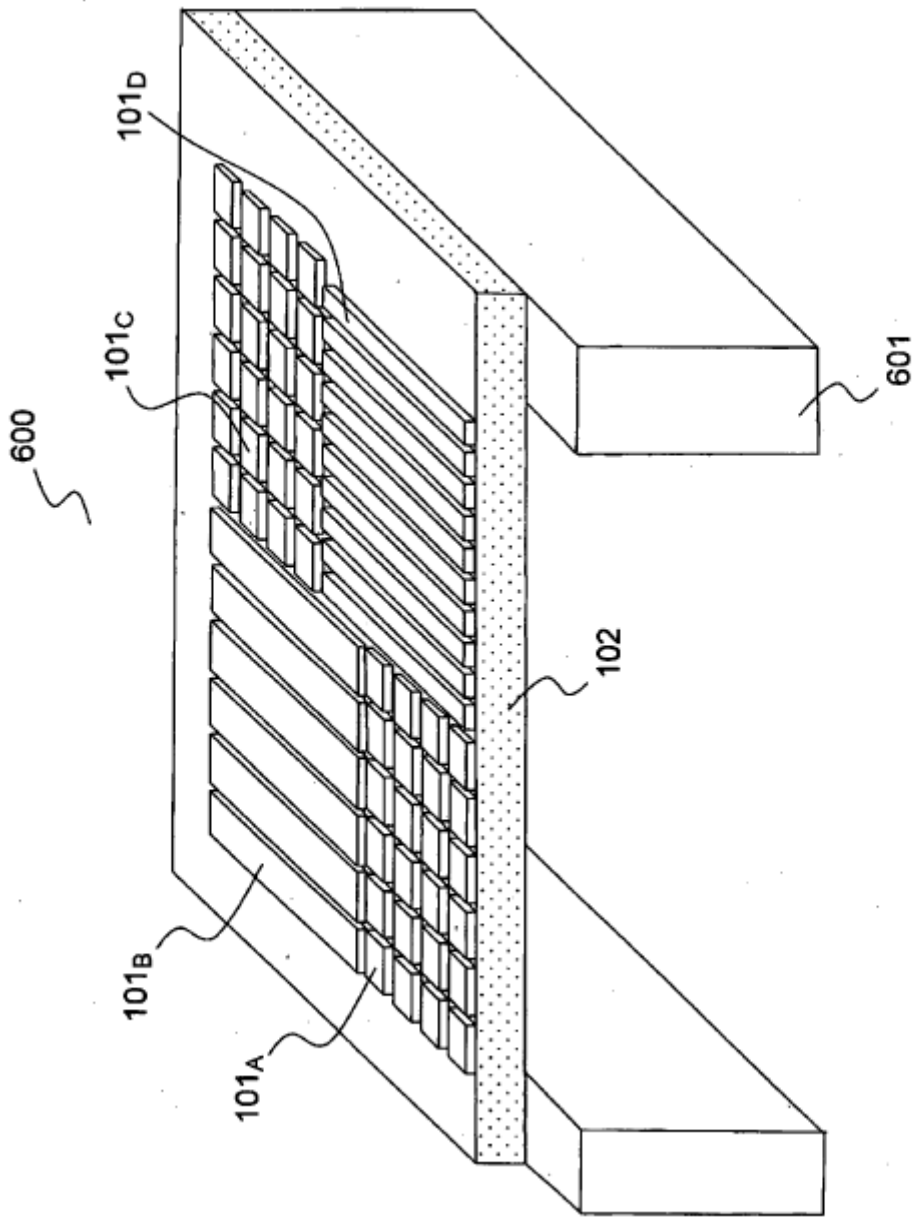


FIG.6

