



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 357 348**

51 Int. Cl.:
G02B 26/12 (2006.01)
G02B 27/44 (2006.01)
G02B 5/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **03781112 .2**
96 Fecha de presentación : **22.12.2003**
97 Número de publicación de la solicitud: **1579263**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **28.09.2005**

54 Título: **Elemento óptico de difracción configurable.**

30 Prioridad: **30.12.2002 NO 20026279**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
25.04.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
25.04.2011

73 Titular/es: **SINVENT AS.**
S.P. Andersensvei 5
7465 Trondheim, NO
The Board of Trustees of the Leland Stanford
Junior University

72 Inventor/es: **Sagberg, Håkon;**
Johansen, Ib-Rune;
Lovhaugen, Odd;
Solgaard, Olav y
Lacolle, Matthieu

74 Agente: **Arias Sanz, Juan**

ES 2 357 348 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

Elemento óptico de difracción configurable.

La presente invención se refiere a un elemento óptico de difracción configurable que comprende una configuración de subelementos de difracción que tienen una superficie reflectante.

5 La descomposición de luz en sus frecuencias (longitudes de onda) constituyentes es fundamental para la espectroscopia óptica. Según esta invención, se proporciona una clase de dispositivos ópticos que sirven como filtros espectrales configurables. Los dispositivos reciben un haz incidente compuesto por luz de diferentes frecuencias. Dirigen parte de la luz en una cierta dirección o sobre un punto focal. Los dispositivos consisten en un sistema de microestructuras de difracción móviles sobre un sustrato. Aplicando diferentes tensiones, temperaturas u otros medios de accionamiento, el filtro recibe el nombre de
10 las microestructuras y así también se altera la composición espectral de la luz difractada.

Los filtros espectrales son importantes para todas las clases de medidas ópticas. En lo sucesivo se usa el término filtro espectral en un sentido amplio para describir todos los dispositivos que eliminan luz selectivamente con frecuencias específicas, total o parcialmente, de una trayectoria luminosa. Si las propiedades del filtro pueden cambiarse con el tiempo aplicando diferentes tensiones, temperaturas u otros medios de accionamiento, el filtro recibe el nombre de
15 ajustable o configurable. No existe una distinción clara entre ajustable y configurable con la excepción de que el segundo término implica que puede conseguirse un intervalo más amplio de posibles funciones del filtro. Los filtros ópticos configurables son especialmente importantes para espectroscopia. Un ejemplo es la red basculable de un monocromador convencional. Para las definiciones que aquí se ofrecen se trata de un ejemplo de un filtro óptico ajustable (o configurable).

20 Un elemento óptico de difracción es un holograma o una red óptica uni o bidimensional, fabricado para sintetizar un campo luminoso mediante exposición a diferentes partes de un haz de luz incidente para diferentes retardos de fase y/o modulaciones de amplitud. Con sistemas microelectromecánicos (SMEM) es posible fabricar EOD configurables. Con la tecnología actual de micromecanizado de silicio no es difícil fabricar piezas móviles con dimensiones inferiores a 10 micrómetros. En un EOD configurable (EODC) la parte superior de dichas piezas móviles será una superficie óptica:
25 espejos, redes o estructuras más complejas para filtro o enfoque. En lo sucesivo se llamará a cada superficie subelemento de difracción. Sus posiciones relativas pueden ajustarse con una resolución muy inferior a las longitudes de onda ópticas típicas, y la interferencia entre reflexiones de las diferentes partes determina el campo luminoso resultante.

Se ha diseñado e implementado un EODC para sintetizar filtros espectrales ("el policromador") por parte de G.B. Hocker y col. "The polychromator: A programmable SMEM diffraction grating for synthetic spectra" en Solid-State Sensor and Actuator Workshop, páginas 89-91, Hilton Head Island, Carolina del Sur, junio de 2000. Este dispositivo es una configuración de vigas controlada electrostáticamente. Las vigas pueden moverse verticalmente y la parte superior de cada viga se refleja y desempeña el papel de elemento de la red. La teoría sobre la que se basan los filtros sintéticos viene dada por Michael B. Sinclair y col. "Synthetic spectra: a tool for correlation spectroscopy", Applied Optics, 36(15), 1997, que se basa a su vez en el algoritmo de recuperación de fase (ARF) desarrollado por Gerchberg y Saxton hacia
30 1970. (Véase por ejemplo J.R. Fienup. "Phase retrieval algorithms: a comparison", Applied Optics, 21(15):58-69, 1982). La desventaja del "policromador" es que la luz con un intervalo espectral amplio se difracta en un único ángulo, lo que limita la resolución que puede obtenerse. Puede obtenerse una resolución superior con un número mayor de vigas, pero así se aumenta la complejidad del dispositivo y su control deja de ser práctico. También es una desventaja que la luz no pueda enfocarse en un detector. Es posible con una red cóncava reglada o, como se mostrará, con un patrón de difracción de enfoque. Finalmente, los numerosos huecos entre los elementos de la red móvil pueden reducir la eficacia de la difracción.
35 40

La patente de EE.UU. 5.905.571, Aparato óptico para formar espectrómetros de correlación y procesadores ópticos, describe un aparato óptico para formar espectrómetros de correlación y procesadores ópticos. El aparato óptico comprende uno o más elementos ópticos de difracción formados en un sustrato para recibir luz de una fuente y procesar
45 la luz incidente. El aparato óptico incluye un elemento de direccionamiento para dirigirse alternativamente a cada elemento óptico de difracción del mismo para producir durante una unidad de tiempo una primera correlación con la luz incidente, y para producir durante una unidad de tiempo diferente una segunda correlación con la luz incidente que sea diferente de la primera correlación. En un ejemplo, el aparato óptico está en la forma de un espectrómetro de correlación; y en otras formas de realización, el aparato está en la forma de un procesador óptico. En algunas formas de realización, el aparato óptico comprende una pluralidad de elementos ópticos de difracción en un sustrato común para formar las redes primera y segunda que interceptan alternativamente la luz incidente para diferentes unidades de tiempo. En otras formas de realización, el aparato óptico incluye una red de difracción programable eléctricamente que puede conmutarse alternativamente entre una pluralidad de estados de red de la misma para procesar la luz incidente. El aparato óptico puede formarse, al menos en parte, por un procedimiento de micromecanización.
50

55 La patente de EE.UU. 5.757.536, Red de difracción programable eléctricamente, describe una red de difracción programable eléctricamente. La red programable incluye un sustrato que tiene una pluralidad de electrodos formados en la misma y un elemento de red móvil encima de cada uno de los electrodos. Los elementos de la red son programables electrostáticamente para formar una red de difracción para difractar un haz de luz incidente cuando se refleja desde las superficies superiores de los elementos de la red. La red de difracción programable, formada por un procedimiento de

5 micromecanización, tiene aplicaciones para procesamiento de información óptica (por ejemplo, dispositivos de correlación óptica y ordenadores), para multiplexado y demultiplexado de una pluralidad de haces luminosos de diferentes longitudes de onda (por ejemplo, para comunicaciones por fibra óptica), y para formación de espectrómetros (por ejemplo, espectrómetros de correlación y de barrido). Un dispositivo de este tipo presenta la desventaja de tener que controlar un gran número de elementos para conseguir una alta resolución espectral dentro de un intervalo espectral estrecho.

La solicitud US-2002/0.105.725 también desvela un EODC.

10 El objeto de esta invención es proporcionar un elemento óptico de difracción configurable que proporcione una buena resolución dentro de un intervalo de frecuencias escogido, por ejemplo, para búsquedas espectrales, con un número bajo de partes accionadas eléctricamente. La invención proporciona también el enfoque del haz de luz, eliminando la necesidad de componentes ópticos adicionales.

Esto se obtiene usando un elemento según las reivindicaciones adjuntas.

Según los ejemplos son posibles varias extensiones/mejoras de la red de difracción programable eléctricamente. Se recogerán a continuación y se explicarán en detalle más adelante.

15 - Puede prepararse un EODC para enfocar la luz. Así se reduce la necesidad de componentes ópticos adicionales, que pueden ser caros y requerir una alineación difícil. Una forma de preparar un dispositivo de enfoque consiste en modelar los subelementos de difracción como zonas de Fresnel o sectores de zonas de Fresnel.

20 - Puede usarse un número bajo de subelementos anchos con una superficie de red brillante en lugar de un número elevado de subelementos estrechos con una superficie reflectante plana. Véase la diferencia entre la fig. 1 y la fig. 2. Para un gran grupo de aplicaciones se reducirá así la complejidad mecánica del EODC y se aumentará la eficacia de la difracción.

- La modulación de fase también puede obtenerse moviendo la viga hacia los lados, es decir, en una dirección paralela a la superficie. Con tecnología de silicio sobre aislante (SOI) con accionadores de tipo peine es posible preparar mejores superficies ópticas con menos etapas de procedimiento.

25 - Los ejemplos anteriores son todos redes unidimensionales. Incluso la estructura de zonas de Fresnel puede considerarse una configuración unidimensional en coordenadas polares. En el caso más general, el plano del EODC puede dividirse en placas arbitrarias, en las que cada placa es un subelemento de difracción con modulación de fase por movimiento vertical u horizontal.

A continuación, la invención se describirá con referencia a los dibujos adjuntos.

30 la fig. 1 ilustra la técnica conocida en la que la red está constituida por la posición relativa entre una serie de superficies planas reflectantes;

la fig. 2 ilustra el principio de un ejemplo;

la fig. 3 ilustra un primer ejemplo alternativo;

la fig. 4 ilustra un segundo ejemplo alternativo;

35 la fig. 5 ilustra un tercer ejemplo en el que los subelementos constituyen una configuración bidimensional.

La teoría de una red según se ilustra en la fig. 1 se describe del modo siguiente: la aproximación de Fraunhofer a la difracción de campo lejano desde una pantalla plana consiste simplemente en tomar la transformada de Fourier del campo óptico en la pantalla. Para una dimensión espacial, esto puede escribirse como

$$U(k \sin \theta) = F[u(x)] \quad (1)$$

40 en la que $k = 2\pi/\lambda$, θ es el ángulo de difracción y x la posición de la pantalla. Si se fuera a diseñar un EOD para luz colimada con ángulo incidente cero, U sería la función objeto y $u(x)$ el coeficiente de transmisión/reflexión complejo de la apertura de EOD. U es una función del producto entre k y $\sin \theta$; la longitud de onda y el ángulo desempeñan los mismos papeles. Puede usarse un EOD para sintetizar un patrón espacial (angular) para una longitud de onda fija, o un patrón espectral para un ángulo fijo, o una combinación de ambos. A no ser que se indique lo contrario, en lo sucesivo se considerarán patrones espectrales en un ángulo fijo y se escribe como $k_x = k \sin \theta$.

45 Para determinar la forma de la superficie de difracción que produce la función objeto U en el campo lejano se obtiene la transformada inversa de Fourier de la Ec. 1:

$$u(x) = F^{-1}[U(k \sin \theta)] \quad (2)$$

Se obtiene como resultado una función compleja $u(x)$ en la que varían el ángulo de fase y la amplitud. Sin embargo, es común que se impongan algunas restricciones sobre $u(x)$, por ejemplo que $|u(x)| = 1$. Esto significa que se está limitado a, o se ha elegido, controlar sólo la fase de $u(x)$. En este caso es preciso recurrir a un algoritmo numérico para encontrar $u(x)$. Un ejemplo de dicho algoritmo es el ARF, que aparece en diferentes variantes con distintos nombres. En este caso, la $u(x)$ se encuentra por transformadas de Fourier iterativas, aplicando restricciones o limitaciones en los dominios espacial y espectral.

En referencia a la fig. 1, que ilustra la técnica conocida, una configuración de vigas como el "policromador" descrito anteriormente es un dispositivo adecuado para mostrar las propiedades básicas de EOD configurables y la transformada de Fourier iterativa. Despreciando el espacio entre elementos, el coeficiente de reflexión complejo de la configuración de vigas puede escribirse como

$$u(x) = \exp[i\phi(x)] = \left[\sum_{n=1}^N u_n \delta(x - nd) \right] * p(x) \quad (3)$$

$p(x)$ es el coeficiente de reflexión de una única viga, $u_n = \exp(i\Phi_n)$, y * representa convolución. Para vigas con superficies especulares planas, $p(x) = \text{rect}(x/d)$. La relación entre altura h y retardo de fase Φ de EOD es $\Phi = 2\pi h (\cos \alpha + \cos \beta)/\lambda$, para luz con ángulo incidente α y ángulo difractado β .

La transformada de Fourier de la Ec. 3 es

$$U(k_s) = F \left[\sum_{n=1}^N u_n \delta(x - nd) \right] F [p(x)] = \left[\sum_{n=1}^N u_n \exp(-ik_s nd) \right] P(k_s) \quad (4)$$

La suma entre corchetes es simplemente la serie de Fourier truncada con coeficientes u_n . La serie es periódica en k_x con periodo $\Delta k_x = 2\pi/d$. Este término se multiplica por la transformada de Fourier de $p(x)$. En el caso en que $p(x) = \text{rect}(x/d)$, $P(k_x) = \text{senc}(k_x d/2\pi)$, dada una función objeto U , los coeficientes u_n pueden determinarse, por ejemplo, con el algoritmo ARF descrito anteriormente. En cuanto a una red regular, la frecuencia óptica más elevada que puede resolverse es proporcional a Nd , el producto del número de elementos de red y el periodo de red, mientras que la frecuencia de corte o el intervalo espectral libre vienen dados por el primer cero de la función envolvente senc:

$$P(k_s) = \text{senc}(k_x d) = 0 \Leftrightarrow k_{x0} = 2\pi / d \quad (5)$$

Muchas aplicaciones de espectroscopia requieren una resolución relativamente alta en una frecuencia relativamente estrecha Δk_x centrada en la frecuencia k_c .

A partir de la Ec. 5 se observa que para asegurar que k_c sea inferior a k_{x0} , el periodo d debe ser suficientemente bajo. Se necesita un d bajo para conseguir un intervalo espectral suficientemente amplio. Pero como la resolución es proporcional a Nd , se necesita un N grande para mantener una alta resolución. Esto produce un dispositivo complejo en el que deben controlarse individualmente centenares o miles de vigas. En M.A. Butler y col. "A SMEM-based programmable diffraction grating for optical holography in the spectral domain", en IEDM, 2001, se encuentra un modo de mejorar el diseño del "policromador" en el que se usa una red adicional en la trayectoria luminosa. Los autores de la invención encuentran mucho más conveniente cambiar la superficie de las vigas en sí. A continuación se describe la solución, una configuración de redes.

La fig. 2 ilustra una configuración de redes según un ejemplo en el que la parte superior plana de las vigas según la técnica conocida descrita anteriormente se sustituye por una red corta con un periodo de red $d_s < d$. Para una red sinusoidal se tiene que $p(x) = \text{rect}(x/d) \exp(i2\pi x/d_s)$. A continuación se tiene que $P(k_x) = \text{senc}(k_x d/2\pi - d/d_s)$. Se trata esencialmente de un desplazamiento de la envolvente senc de la Ec. 5 a la frecuencia que se elija. El desplazamiento de frecuencia está determinado por el cociente entre los dos periodos de red. Así es posible conseguir filtro de alta resolución espectral con un número bajo de vigas/elementos.

La fig. 3 ilustra una solución similar en la que los subelementos de difracción se mueven lateralmente. Si un elemento se mueve lateralmente una distancia D , la relación entre Φ y D es $\Phi = 2\alpha D (\sin \alpha - \sin \beta)/\lambda$, despreciando la contribución del área que rodea al subelemento.

Muchos dispositivos SMEM se basan en estructuras SOI con movimiento lateral accionadas por accionadores de tipo peine electrostáticos. Estas estructuras son más rígidas y también más fáciles de fabricar que el procedimiento de polisilicio multicapa usado a menudo para fabricar estructuras de viga con movimiento vertical.

La fig. 4 ilustra un dispositivo de enfoque según un ejemplo. Extendiéndose a subelementos con formas arbitrarias, es posible fabricar filtros espectrales configurables de enfoque. Si se modelan los subelementos como zonas de Fresnel correspondientes a una distancia focal dada, puede mostrarse que la intensidad en el enfoque es la misma que para una configuración unidimensional de vigas o configuración de redes.

Según la invención es posible usar una configuración de subelementos rectangulares de igual tamaño con patrones de difracción de enfoque. La síntesis espectral con dichas estructuras será diferente, ya que la contribución a la difracción integral desde un único elemento deja de corresponder a un único término en la serie de Fourier como en la Ec. 4.

5 La fig. 5 ilustra una configuración doble según un ejemplo que proporciona una matriz bidimensional de elementos especulares, cada uno de los cuales comprende una red de difracción en la superficie.

10 Haciendo una transformada inversa de Fourier de la función objeto como en la Ec. 2 se obtiene una función compleja $u(x)$ con información de fase y amplitud. Se puede implementar un EODC con control de amplitud y fase con una configuración doble de redes, o una configuración de pares de subelementos. Si los dos subelementos tienen igual posición vertical, existe interferencia constructiva con amplitud máxima. Si las alturas de los subelementos difieren en valor correspondiente a desplazamiento de fase π , existe interferencia destructiva y se tiene amplitud cero. La luz se difracta fuera de la trayectoria.

Según se describe en referencia a las fig. 2 a 5, la presente invención proporciona una solución con más subelementos 2 en la que a cada subelemento se le proporciona una red. La red en cada subelemento puede proporcionarse con cualquier periodo de red adecuado sin otras limitaciones que las presentes en la producción de redes corrientes.

15 Las dimensiones de los subelementos de difracción según la invención deben corresponder preferentemente a una serie de periodos para las redes en cada subelemento, por ejemplo, en el orden de 100 μm .

Así es posible proporcionar una red de difracción ajustable con mayor resolución que las redes similares según la técnica conocida, siendo así más adecuada, por ejemplo, para estudios espectroscópicos, filtrado espectral, etc.

20 Las vigas o subelementos según las fig. 2, 4 y 5 pueden moverse en direcciones perpendiculares a la superficie del elemento. Sin embargo, en la fig. 3, según se describe anteriormente, las posiciones de los subelementos pueden desplazarse en la dirección lateral paralela a la superficie. Naturalmente, es posible cualquier combinación de estos movimientos, aunque más complicado de obtener en la práctica. Normalmente, el movimiento con respecto a la dirección de la luz de entrada o reflejada debe estar en el orden de la longitud de onda de la luz.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Elemento óptico de difracción configurable que comprende una configuración de subelementos de difracción rectangulares de igual tamaño, teniendo cada uno una superficie reflectante, en el que cada subelemento está adaptado para poder moverse de forma controlable en la dirección vertical con respecto a la superficie del elemento, y en el que una serie de los subelementos están dotados de una red de difracción reflectante con una serie de características espectrales escogidas **caracterizado porque** la red de dicha serie de subelementos presenta un patrón de difracción de enfoque que constituye una lente de difracción.
2. Elemento óptico de difracción según la reivindicación 1 en el que la dimensión física del subelemento es sustancialmente mayor que el periodo espacial típico de la red de difracción en dichos subelementos.
- 10 3. Elemento óptico de difracción según la reivindicación 1 en el que la configuración de subelementos es una configuración bidimensional.

configuración de vigas

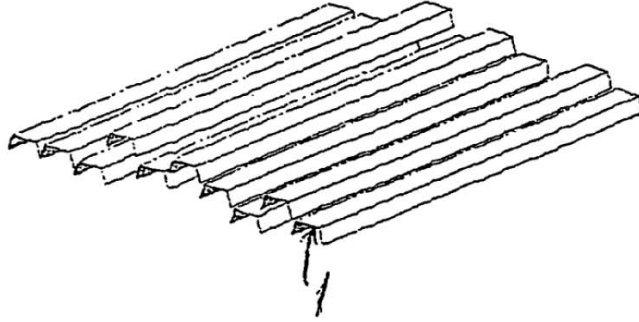


Figura 1: configuración de vigas

configuración de redes

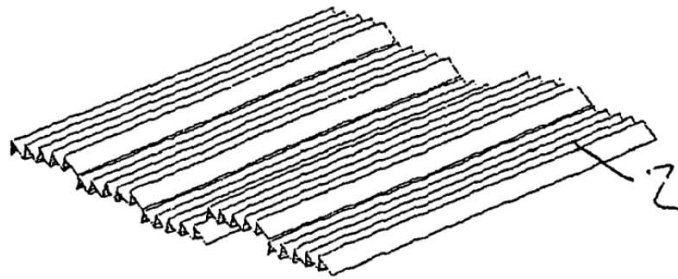


Figura 2: configuración de redes

configuración lateral

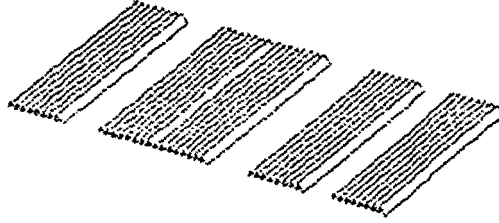


Figura 3: configuración de movimiento lateral

configuración de enfoque

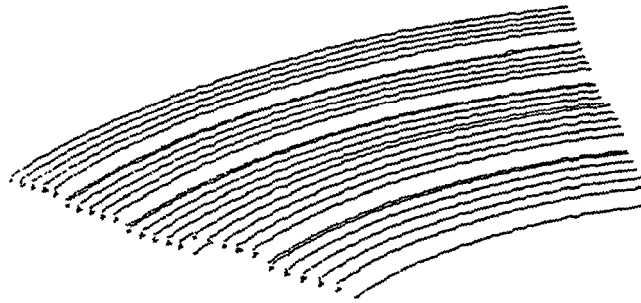


Figura 4: configuración de enfoque

configuración doble

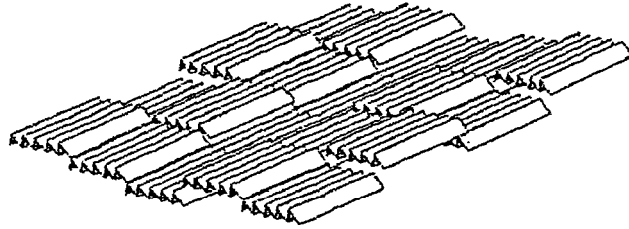


Figura 5: configuración doble