

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 573 932**

51 Int. Cl.:

**G02F 1/225** (2006.01)

**G02F 2/02** (2006.01)

**G02F 1/03** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.08.2007 E 07827641 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.03.2016 EP 2185972**

54 Título: **Variador óptico de frecuencia accionado eléctricamente**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**13.06.2016**

73 Titular/es:

**FINMECCANICA - SOCIETÀ PER AZIONI (100.0%)  
Piazza Monte Grappa 4  
Roma, IT**

72 Inventor/es:

**DISPENZA, MASSIMILIANO;  
FIORELLO, ANNA MARIA y  
VARASI, MAURO**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 573 932 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

Variador óptico de frecuencia accionado eléctricamente

5 **Campo técnico de la invención**

La presente invención se refiere, en general, a un variador óptico de frecuencia accionado eléctricamente, en particular para su uso en un sistema óptico para variar una frecuencia de una señal óptica que se propaga en una guía de ondas óptica a frecuencias muy altas.

10

**Técnica antecedente**

Como se sabe, desde los tiempos iniciales de la telefonía y telegrafía, las señales de comunicaciones se han transmitido tradicionalmente a través de hilos y cables de cobre. Sin embargo, en los últimos años, un volumen creciente de las señales de comunicaciones se transmite en forma de haces de luz a través de guías de ondas ópticas. Se han desarrollado diversos tipos de equipos periféricos, tales como conectores y conmutadores basados en guías de ondas ópticas. En particular, se usa ampliamente una tecnología conocida como óptica integrada en el manejo de las señales ópticas de comunicaciones. Usando esta tecnología, las señales de comunicaciones en forma de haces de luz se transmiten a través de guías de ondas ópticas formadas en sustratos fabricados de materiales electro-ópticos tales como niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ), que es probablemente el material usado más ampliamente debido a sus propiedades electro-ópticas mejoradas y a la posibilidad de fabricar guías de ondas ópticas de bajas pérdidas.

15

20

25

Aunque actualmente la óptica integrada se usa ampliamente en la transmisión de señales, la satisfacción de la continua demanda de dispositivos ópticos que funcionen en frecuencias cada vez más altas está limitada por la dificultad de realización de variadores ópticos de frecuencia con las características apropiadas.

30

La figura 1 muestra una representación típica de un variador óptico de frecuencia que tiene una entrada óptica, donde se recibe una señal óptica de entrada con una frecuencia óptica de entrada, una entrada eléctrica, donde se recibe una señal de accionamiento eléctrico de RF, con una frecuencia eléctrica en el intervalo de las microondas, para accionar eléctricamente el variador óptico de frecuencia, y una salida óptica, donde se proporciona una señal óptica de salida con una frecuencia óptica de salida igual a la frecuencia óptica de entrada de la señal óptica de entrada incrementada por la frecuencia eléctrica de la señal de accionamiento eléctrico. La figura 1 también muestra los espectros ópticos de las señales ópticas de entrada y salida, así como el patrón de tiempos de la señal de accionamiento eléctrico.

35

40

La figura 2 muestra una representación esquemática de un variador óptico de frecuencia 1 conocido, que incluye básicamente una estructura de guía de ondas óptica 2 formada en un sustrato 3 (mostrado en la figura 3 siguiente) de un material electro-óptico, normalmente niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ), de una forma convencional, por ejemplo mediante la difusión selectiva de titanio dentro del sustrato 3.

45

El sustrato 3 tiene una estructura cristalina de corte "X", es decir, una estructura cristalina con un eje X del cristal que es ortogonal a una superficie principal 3a del sustrato 3 (es decir, la superficie del área mayor); la orientación de la estructura cristalina provoca campos eléctricos y ópticos generados por la señal de accionamiento eléctrico y la señal óptica de entrada para acoplarse principalmente a lo largo de un eje Z del cristal de la estructura cristalina, es decir, el acoplamiento electro-óptico a lo largo de los otros dos ejes del cristal es insignificante en comparación con el acoplamiento electro-óptico a lo largo del eje Z del cristal.

50

De hecho, el efecto electro-óptico provoca que el índice de refracción del material electro-óptico cambie espacialmente en función de la intensidad y dirección de un campo eléctrico externo aplicado al mismo. En particular, a lo largo de una dirección espacial dada, el índice de refracción cambia proporcionalmente a la intensidad del campo eléctrico a lo largo de esa dirección.

55

Los cambios del índice de refracción a lo largo de los tres ejes de cristal X, Y y Z del material electro-óptico pueden calcularse multiplicando escalarmente el vector del campo eléctrico por una matriz 3x3 de coeficientes electro-ópticos. En el caso de un cristal de  $\text{LiNbO}_3$ , entre los coeficientes de la matriz electro-óptica de 3x3, el coeficiente electro-óptico que tiene el valor más alto es  $r_{33}$  ( $\approx 30 \text{ pm/V}$ ), que se refiere al cambio del índice de refracción experimentado por las ondas electromagnéticas polarizadas a lo largo del eje Z del cristal respecto al componente del campo eléctrico a lo largo del mismo eje.

60

65

La estructura de guía de ondas óptica 2 comprende una estructura de guía de ondas 4 con forma de Y y una estructura de guía de ondas 5 con forma de Y invertida acopladas en serie. La estructura de guía de ondas 4 con forma de Y incluye una rama de entrada 6 configurada para acoplarse, durante el uso, a una fibra óptica de entrada (no mostrada), y un par de ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente, que se ramifican a partir de la rama de entrada 6. La estructura de guía de ondas 5 con forma de Y invertida comprende un par de ramas 8 mutuamente no acopladas ópticamente, acopladas a las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente respectivas de la estructura

de guía de ondas 4 con forma de Y, y que se combinan en una rama de salida 9 configurada para acoplarse, durante el uso, a una fibra óptica de salida (no mostrada). Una de las ramas 8 mutuamente no acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 5 con forma de Y invertida está estructurada de tal manera que induce un cambio de fase de  $\pi$  radianes en la señal óptica que se propaga a lo largo de la misma.

5 En particular, las dos ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y están separadas en una distancia S (primera separación entre guías de ondas) suficientemente corta para asegurar un acoplamiento óptico mutuo, típicamente variable de 5 a 10  $\mu\text{m}$ , mientras que las dos ramas mutuamente no acopladas ópticamente 8 de la estructura de guía de ondas 5 con forma de Y invertida están separadas en una  
10 distancia D (segunda separación entre guías de ondas) suficientemente alta para impedir el acoplamiento mutuo óptico. Adicionalmente, el grado de acoplamiento  $K_{\text{ACOP}}$  de las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y es una función de la primera separación S entre guías de ondas a través de un factor de proporcionalidad  $e^{-\alpha S}$ , en el que  $\alpha$  es la inversa de la distancia a la que el factor de acoplamiento se reduce a una fracción 1/e del valor extrapolado a una distancia cero.

15 El variador óptico de frecuencia 1 comprende además una estructura de electrodos 10 eléctricamente conductores de 1-30  $\mu\text{m}$  de espesor, formados de oro o metales similares, por encima de la superficie principal 3a del sustrato 3, de una forma convencional, sobre las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y.

20 En particular, como se muestra en la figura 3, la estructura de electrodos 10 incluye un electrodo interior 11 dispuesto entre las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y, y un par de electrodos exteriores 12 dispuestos en el exterior de las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente, en lados opuestos de, y simétricamente respecto a, el electrodo interior 11. Se dispone una capa amortiguadora 13  
25 dieléctrica (por ejemplo de  $\text{SiO}_2$ ) entre la superficie principal 3a del sustrato 3 y la estructura de electrodos 10 para impedir o minimizar la absorción de potencia óptica por la estructura de electrodos 10.

Los electrodos exteriores 12 están generalmente puestos a tierra, mientras que el electrodo interior 11 se alimenta con una señal de accionamiento eléctrico, que tiene una frecuencia eléctrica  $\Omega$  y un momento  $\beta_\Omega$ , que da como  
30 resultado una tensión de accionamiento de RF aplicada entre el electrodo interior 11 y los electrodos exteriores 12. La tensión de accionamiento de RF genera campos eléctricos opuestos entre el electrodo interior 11 y los electrodos exteriores 12; los campos eléctricos tienen una dirección sustancialmente paralela a la superficie principal 3a (y al eje Z del cristal) y transversal a una de las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente respectivas, con orientaciones opuestas. Dado que el único coeficiente electro-óptico con un valor no insignificante es  $r_{33}$ , estos  
35 campos eléctricos opuestos inducen cambios en el índice de refracción opuestos en las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y.

Una señal óptica de entrada, que consiste en un modo simétrico simple con un índice de propagación  $N_S$ , una frecuencia óptica  $\omega_S$  y un momento  $\beta_S$ , y recibida en la rama de entrada 6 del variador óptico de frecuencia 1, se propaga a lo largo de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y que, debido al acoplamiento mutuo óptico de sus ramas, es vista operativamente por la señal óptica de entrada como una única guía de ondas que puede soportar dos supermodos distintos con paridad opuesta, conocidos como supermodo simétrico y supermodo antisimétrico. En ausencia de otros fenómenos, es decir, sin asimetrías intrínsecas y/o perturbaciones eléctricas, solo se propagaría el supermodo simétrico sin excitar el supermodo antisimétrico. Por lo tanto, solo un supermodo  
45 simétrico simple con la misma potencia que la de la señal óptica de entrada, índice de propagación  $N_S$ , frecuencia óptica  $\omega_S$  y momento  $\beta_S$  inicia su propagación a lo largo de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y.

Durante la propagación, el supermodo simétrico experimenta los cambios en el índice de refracción opuestos anteriormente mencionados, y esto da como resultado que la energía del supermodo simétrico se transfiera parcialmente al supermodo antisimétrico, que inicia la propagación además del supermodo simétrico. El supermodo antisimétrico tiene una frecuencia  $\omega_A$  igual a la frecuencia  $\omega_S$  del supermodo simétrico desplazada ascendentemente en la frecuencia  $\Omega$  de la señal de accionamiento eléctrico aplicada al electrodo interior 11 ( $\omega_A = \omega_S + \Omega$ ), un momento  $\beta_A$  igual al momento  $\beta_S$  del supermodo simétrico desplazado ascendentemente en el momento  $\beta_\Omega$  de la señal de accionamiento eléctrico aplicada al electrodo interno 11 ( $\beta_A = \beta_S + \beta_\Omega$ ) (debido a una limitación de la  
50 conservación del momento), y un índice de propagación  $N_A$ .

Por lo tanto, en la salida de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y están presentes tanto el supermodo simétrico residual como el supermodo antisimétrico, que entra en la estructura de guía de ondas 5 con forma de Y invertida, en cada una de cuyas ramas se propaga una señal óptica compuesta, que tiene la mitad de la potencia de la señal óptica de entrada y que comprende tanto un modo simétrico con dos lóbulos con igual signo, como un modo antisimétrico con dos lóbulos de signos opuestos. Durante la propagación a lo largo de la estructura de guía de ondas 5 con forma de Y invertida, se induce un cambio de fase de  $\pi$  radianes en una de las dos señales ópticas compuestas, obteniendo así en la rama de salida 9 de la estructura de guía de ondas 5 con forma de Y invertida, donde se combinan las dos señales ópticas compuestas, la suma de los dos lóbulos del modo antisimétrico en una  
60 única señal óptica de salida que tiene una frecuencia  $\omega_A$ , y la cancelación de los dos lóbulos del modo simétrico residual.

Una frecuencia de resonancia  $\Omega$  del variador óptico de frecuencia 1, es decir, la frecuencia eléctrica  $\Omega$  de la señal de accionamiento eléctrico que, cuando se proporciona a la entrada eléctrica del variador óptico de frecuencia, produce la máxima eficiencia de variación, es impuesta por las especificaciones de diseño del propio variador óptico de frecuencia y, en particular, es directamente proporcional al grado de acoplamiento  $K_{ACOP}$  de las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y; el grado de acoplamiento  $K_{ACOP}$  es, a su vez, proporcional a  $e^{-\alpha S}$ , donde S es la primera separación entre guías de ondas de las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente, como viene dado por las siguientes fórmulas:

$$\Omega = \frac{c(N_S - N_A)}{\lambda(n_{RF} + N_A)}$$

$$N_S - N_A \propto K_{ACOP} \propto e^{-\alpha S}$$

De ese modo puede obtenerse un incremento en la frecuencia de operación mediante una reducción de la primera separación S entre las guías de ondas de las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente.

El documento de DESORMIERE B. ET AL.: "AN INTEGRATED OPTIC FREQUENCY TRANSLATOR FOR MICROWAVE LIGHTWAVE SYSTEMS" JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, IEEE SERVICE CENTER, NUEVA YORK, NY, EE.UU., vol. 8, n.º 4, 1 de abril de 1990 (1990-04-01), páginas 506- 513, XP0Q0126585 ISSN: 0733-8724 divulga un traductor de frecuencia óptica integrado para sistemas de ondas de luz de microondas, que comprende un acoplador direccional de alimentación en Y, seguido por un convertidor de supermodo, y una unión de ramas en Y, implementados en un material electro-óptico. El convertidor de supermodo se realiza mediante una sección de dos guías de ondas no acopladas sometidas a una tensión de CC  $V_K$ , de modo que se produce una variación de fase diferencial de  $\pi$ .

El documento EP-A-1 424 591 divulga un modulador de Mach-Zehnder electro-óptico de accionamiento simple que comprende un cuerpo de un material electro-ópticamente activo. Las guías de ondas ópticas se forman al menos parcialmente en ese material y constituyen un interferómetro de Mach-Zehnder que tiene dos extremidades que proporcionan trayectorias de luz alternativas entre una entrada y una salida, de modo que pueden tener lugar interferencias entre la luz que toma las trayectorias alternativas al recombinarse en la salida. Se proporcionan al menos dos conjuntos de electrodos, para someter a secciones longitudinalmente separadas de al menos una de las extremidades a un campo eléctrico, y en al menos una de las secciones las guías de ondas de las dos extremidades están acopladas.

El documento US 2003/002766 A1 divulga un modulador electro-óptico de guía de ondas óptica integrado coplanario que comprende un sustrato de un material electro-óptico, al menos dos guías de ondas ópticas integradas en el sustrato en correspondencia con una superficie del mismo y un sistema de electrodos dispuesto sobre la superficie para la aplicación de un campo eléctrico modulante a las guías de ondas, adecuado para provocar una modulación de un índice de refracción de las dos guías de ondas en una zona de modulación del dispositivo (50). Las guías de ondas se forman, para al menos una sección del mismo, en la zona de modulación del dispositivo, en zonas del sustrato respectivas que tienen coeficientes electro-ópticos de signo opuesto a lo largo de un eje transversal a las secciones de guía de ondas, de modo que un campo eléctrico modulante de la misma dirección y orientación en las secciones de guía de ondas provoca modulaciones del índice de refracción de signo opuesto en las secciones de guía de ondas. Pueden obtenerse así moduladores de guía de ondas coplanarios exentos de chirridos y moduladores de banda coplanarios dobles de accionamiento simple.

El documento de F. LUCCHI ET AL.: "Very low voltage single drive domain inverted LiNbO3 integrated electro-optic modulator" OPTICS EXPRESS, vol. 15, n.º 17, 9 de agosto de 2007 (2007-08-09), páginas 10739-10743, XP002479927 divulga el uso de una inversión del dominio para mejorar significativamente el rendimiento de un modulador electro-óptico de guía de ondas de LiNbO<sub>3</sub> de corte "Z". Los brazos de la guía de ondas del interferómetro de Mach-Zehnder se colocan en zonas de dominio con orientación opuesta bajo el mismo electrodo, más estrecho y más eficiente, de modo que puedan conseguirse aún variaciones de fase opuestas (efecto de contrafase o *push-pull*) a pesar de que los brazos estén sometidos al mismo campo eléctrico.

### Objeto y sumario de la invención

El solicitante ha experimentado que la continua demanda para frecuencias de resonancia crecientes, y por ello variaciones de frecuencia, de los variadores ópticos de frecuencia, es muy difícil de satisfacer debido a la dificultad, si no a la imposibilidad, de reducir por debajo de ciertos valores la separación entre guías de ondas de las ramas mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas con forma de Y.

De hecho, como se ha descrito previamente, para acoplar electro-ópticamente los campos eléctricos y ópticos generados por la señal de accionamiento eléctrico y la señal óptica de entrada, consiguiendo así la variación de frecuencia, es necesario que las señales ópticas que fluyen en las ramas mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas con forma de Y experimenten cambios opuestos de los índices de refracción, de modo

que exciten el supermodo antisimétrico. Para conseguir este resultado, las ramas mutuamente acopladas ópticamente se disponen entre el electrodo interior y los electrodos exteriores, donde los campos eléctricos son paralelos al eje Z del cristal y tienen orientaciones opuestas.

5 La reducción excesiva de la separación entre guías de ondas de las ramas mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas con forma de Y daría como resultado que las ramas mutuamente acopladas ópticamente se dispusieran por debajo del electrodo interior donde los campos eléctricos son paralelos al eje X del cristal y están orientados en la misma dirección, impidiendo así cualquier acoplamiento electro-óptico entre los campos eléctrico y óptico.

10 A la vista de lo anterior, el solicitante ha apreciado que la arquitectura actual de los variadores ópticos de frecuencia representa un obstáculo para un incremento significativo en la frecuencia de resonancia y, por ello, en la variación de frecuencia que puede conseguirse por los variadores ópticos de frecuencia conocidos.

15 El objetivo de la presente invención es por tanto proporcionar un variador óptico de frecuencia mejorado que supere las limitaciones de los variadores ópticos de frecuencia conocidos, permitiendo así conseguir frecuencias de operación más altas de los dispositivos ópticos.

20 Este objetivo se consigue mediante la presente invención en tanto que se refiere a un variador óptico de frecuencia, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

25 La presente invención consigue el objetivo anteriormente mencionado usando un sustrato electro-óptico con una estructura cristalina de corte "Z" y que comprende dos partes con polos opuestos, es decir, partes que tienen orientaciones opuestas del eje Z del cristal, y mediante la disposición del electrodo interior centrado por encima de un límite entre las partes de los dos polos opuestos, y finalmente mediante la disposición de la ramas mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas con forma de Y por debajo del electrodo interior, muy próximas entre sí, y sobre lados opuestos del límite, de modo que las ramas mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas con forma de Y se dispongan en partes respectivas del sustrato que tienen orientaciones opuestas del eje Z del cristal.

30 Las orientaciones opuestas del eje Z del cristal en las dos partes del sustrato provocan que el coeficiente electro-óptico  $r_{33}$  tenga valores opuestos en estas partes y, por ello, incluso aunque las ramas mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas con forma de Y se dispongan en un área del sustrato (por debajo del electrodo interior) donde los campos eléctricos son paralelos al eje Z del cristal y están orientados en la misma dirección, las señales ópticas que fluyen en las ramas mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas con forma de Y experimentan cambios opuestos en el índice de refracción, excitando así el supermodo antisimétrico y consiguiendo la variación de frecuencia deseada.

40 Por otro lado, la reducción significativa en la separación entre guías de ondas de las ramas mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas con forma de Y, permite que el grado de acoplamiento  $K_{ACOP}$  se incremente significativamente y, por ello, también se incremente considerablemente la frecuencia de resonancia  $\Omega$  del variador óptico de frecuencia.

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

Para una mejor comprensión de la presente invención, se describirán ahora realizaciones preferidas, que están concebidas meramente a modo de ejemplo y no han de interpretarse como limitativas, con referencia a los dibujos adjuntos (no todos a escala), en los que:

- 50
- la figura 1 muestra una representación típica de un variador óptico de frecuencia, junto con trazados asociados a las señales eléctricas y ópticas del mismo;
  - la figura 2 muestra una representación esquemática de un variador óptico de frecuencia conocido, y de los modos ópticos de propagación a lo largo del mismo;
  - la figura 3 muestra una sección transversal de un área del variador óptico de frecuencia de la figura 2; y
- 55
- la figura 4 muestra una sección transversal de un área de un variador óptico de frecuencia de acuerdo con una realización preferida de la presente invención.

#### **Descripción detallada de las realizaciones preferidas de la invención**

60 Se presenta la siguiente explicación para permitir a un experto en la materia realizar y usar la invención. Serán fácilmente evidentes para los expertos en la materia diversas modificaciones a las realizaciones, sin apartarse del alcance de la presente invención tal como se reivindica. Por tanto, la presente invención no se ha concebido para que esté limitada a las realizaciones mostradas, sino que estará de acuerdo con el más amplio alcance coherente con los principios y características divulgados en el presente documento y definidos en las reivindicaciones adjuntas.

65

La figura 4 muestra una sección transversal de un área de un variador óptico de frecuencia, de acuerdo con una realización preferida de la presente invención, en la que los mismos números y signos de referencia que los de la figura 3 designan los mismos elementos, por lo que no se describirán de nuevo.

5 Como se muestra en la figura 4, una estructura cristalina del sustrato 3 tiene una orientación de corte "Z", es decir, una estructura cristalina con un eje Z del cristal que es ortogonal a la superficie principal 3a del sustrato 3, por encima del cual se dispone la estructura de electrodos 10 eléctricamente conductores. Esta configuración del sustrato provoca que los campos eléctricos y ópticos generados por una señal de accionamiento eléctrico y una señal óptica de entrada se acoplen principalmente a lo largo del eje X del cristal de la estructura cristalina, es decir, el acoplamiento electro-óptico a lo largo de los otros dos ejes del cristal es insignificante en comparación con el acoplamiento electro-óptico a lo largo del eje X del cristal. De hecho, en este caso, el coeficiente electro-óptico  $r_{33}$  de la matriz de coeficientes electro-ópticos 3x3 con el valor más alto se refiere al cambio en el índice de refracción experimentado por las ondas electromagnéticas polarizadas a lo largo del eje X del cristal respecto al componente del campo eléctrico a lo largo del mismo eje.

15 Además, el sustrato 3, al menos en el área en la que se dispone la estructura de electrodos 10, se trata preliminarmente de modo que comprenda dos zonas con polos opuestos 20, 21, es decir, partes que tienen orientaciones opuestas del eje Z del cristal (como se muestra esquemáticamente por las flechas de la figura 4); las orientaciones opuestas provocan que el coeficiente electro-óptico  $r_{33}$  tenga valores opuestos en las dos partes con polos opuestos 20, 21, dando como resultado así una inducción de cambios opuestos en el índice de refracción por los campos eléctricos orientados equitativamente a lo largo del eje Z de cristal.

25 Adicionalmente, el electrodo interior 11 de la estructura de electrodos 10 se dispone por encima de un límite 22 entre las dos partes con polos opuestos 20, 21 del sustrato 3, y las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y se disponen por debajo del electrodo interior 11, muy próximas entre sí (separadas por la primera separación S entre guías de ondas), y sobre lados opuestos del límite 22. De ese modo, las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente se disponen en partes respectivas del sustrato 3 que tienen orientaciones opuestas del eje Z del cristal y valores opuestos del coeficiente electro-óptico  $r_{33}$ . Más aún, las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente son atravesadas por campos eléctricos orientados equitativamente a lo largo del eje Z del cristal, generados por la señal de accionamiento eléctrico proporcionada al electrodo interior 11 (estando los electrodos exteriores 12 puestos a tierra). En consecuencia, se inducen de nuevo cambios opuestos en el índice de refracción en las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y, permitiendo así una transferencia de energía desde el supermodo simétrico al antisimétrico. En la presente realización de la invención, la primera separación S entre guías de ondas entre las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y varía de 1 a 5  $\mu\text{m}$ .

40 A partir de lo anterior, puede apreciarse inmediatamente que la estructura cristalina de corte "Z" del sustrato 3 y la división del sustrato 3 en dos partes con polos opuestos 20, 21 que tienen coeficientes electro-ópticos opuestos permite disponer las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente bajo el electrodo interior 11, en una posición no permitida por los variadores ópticos de frecuencia conocidos.

45 Por lo tanto, las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente se disponen a una distancia que es mucho menor que en los variadores ópticos de frecuencia conocidos. De esta forma, se consigue un grado de acoplamiento  $K_{\text{ACOP}}$  mayor de las ramas 7 mutuamente acopladas ópticamente de la estructura de guía de ondas 4 con forma de Y y, en consecuencia, un incremento mayor de la frecuencia de operación.

Finalmente, queda claro que pueden realizarse numerosas modificaciones y variaciones a la presente invención, estando incluidas todas ellas dentro del alcance de la invención, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

50 En particular, el sustrato 3 puede fabricarse de otro material electro-óptico de corte "Z", tal como tantalato de litio ( $\text{LiTaO}_3$ ), o titanil-fosfato de potasio (KTP).

## REIVINDICACIONES

1. Variador óptico de frecuencia (1) que comprende:

- 5 - un sustrato electro-óptico (3) que tiene una superficie principal (3a);  
 - una estructura de guía de ondas óptica (2) formada en dicho sustrato (3) y que tiene dos ramas (7) de guía de ondas, que están separadas por una distancia (S), de modo que aseguran un acoplamiento óptico mutuo; y  
 - una estructura de electrodos (10) dispuesta por encima de dicha superficie principal (3a) de dicho sustrato (3) y que tiene al menos un primer electrodo (11), dicho sustrato (3) tiene una estructura cristalina de corte "Z" con el  
 10 eje Z del cristal ortogonal a dicha superficie principal (3a), caracterizado por que dicho sustrato comprende dos partes con polos opuestos (20, 21) que tienen orientaciones opuestas de dicho eje Z del cristal; y por que dichas dos ramas (7) de guía de ondas están dispuestas por debajo de dicho primer electrodo (11), cada una en una de las dos partes con polos opuestos (20, 21) respectivas.

15 2. El variador óptico de frecuencia de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicha estructura de electrodos (10) es operativa para aplicar campos eléctricos orientados equitativamente a dichas ramas (7) de guía de ondas.

3. El variador óptico de frecuencia de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicho sustrato (3) está fabricado de niobato de litio.

20 4. El variador óptico de frecuencia de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dichas partes con polos opuestos (20, 21) están separadas por un límite (22), dicho primer electrodo (11) está dispuesto por encima de dicho límite (22) y dichas dos ramas (7) de guía de ondas están dispuestas sobre lados opuestos de dicho límite (22).

25 5. El variador óptico de frecuencia de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicha estructura de electrodos (10) comprende dos segundos electrodos (12), dispuesto cada uno por encima de una de dichas dos partes con polos opuestos (20, 21) respectivas, sobre lados opuestos de, y simétricamente respecto a, dicho primer electrodo (11).

30 6. El variador óptico de frecuencia de acuerdo con la reivindicación 5, en el que dichos dos segundos electrodos (12) están conectados a una señal de referencia, y dicho primer electrodo (11) está conectado a una entrada de señal de accionamiento eléctrico de dicho variador óptico de frecuencia (1).

35 7. El variador óptico de frecuencia de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicha estructura de guía de ondas óptica (2) comprende una estructura de guía de ondas (4) con forma de Y y una estructura de guía de ondas (5) con forma de Y invertida acopladas en serie; en el que dicha estructura de guía de ondas (4) con forma de Y comprende una rama de entrada (6) configurada para acoplarse a una entrada de señal óptica y dichas ramas (7) de guía de ondas se ramifican desde dicha rama de entrada (6), y dicha estructura de guía de ondas (5) con forma de Y invertida comprende un par de ramas (8) mutuamente no acopladas ópticamente acopladas a dichas ramas (7) de guía de ondas, y que se combinan en una rama de salida (9) configurada para acoplarse a una salida de señal óptica.

45 8. El variador óptico de frecuencia de acuerdo con la reivindicación 7, en el que una de dichas ramas (8) mutuamente no acopladas ópticamente de dicha estructura de guía de ondas (5) con forma de Y invertida está estructurada de tal manera que induce un cambio de fase de  $\pi$  radianes en una señal óptica que se propaga a lo largo del mismo.

50 9. Un proceso para la fabricación de un variador óptico de frecuencia (1) que comprende:

- proporcionar un sustrato electro-óptico (3) que tiene una superficie principal (3a);  
 - formar una estructura de guía de ondas óptica (2) en dicho sustrato (3), teniendo dicha estructura de guía de ondas (2) dos ramas (7) de guía de ondas, que están separadas por una distancia (S), de modo que aseguran el acoplamiento óptico mutuo; y  
 55 - formar una estructura de electrodos (10) por encima de dicha superficie principal (3a) de dicho sustrato (3), teniendo dicha estructura de electrodos (10) al menos un primer electrodo (11),

caracterizado por que proporcionar un sustrato electro-óptico comprende:

- 60 - formar dicho sustrato (3) con una estructura cristalina de corte "Z" que tiene un eje Z del cristal ortogonal a dicha superficie principal (3a) y tratar dicho sustrato (3) de modo que forme dos partes con polos opuestos (20, 21) que tienen orientaciones opuestas de dicho eje Z del cristal; y por que:  
 - formar dicha estructura de guía de ondas óptica (2) comprende disponer dichas dos ramas (7) de guía de ondas por debajo de dicho primer electrodo (11), cada una en una de dichas dos partes con polos opuestos (20, 21)  
 65 respectivas.

10. El proceso de acuerdo con la reivindicación 9, en el que dicho sustrato (3) está fabricado de niobato de litio.

5 11. El proceso de acuerdo con cualquier reivindicación 9 o 10, en el que dichas partes con polos opuestos (20, 21) están separadas por un límite (22), y la formación de una estructura de electrodos (10) comprende disponer dicho primer electrodo (11) por encima de dicho límite, y la disposición de dichas dos ramas (7) de guía de ondas comprende disponer dichas dos ramas (7) de guía de ondas sobre lados opuestos de dicho límite (22).

10 12. El proceso de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 9-11, en el que formar una estructura de electrodos (10) comprende disponer dos segundos electrodos (12) cada uno por encima de una de dichas dos partes con polos opuestos (20, 21) respectivas, sobre lados opuestos de, y simétricamente respecto a, dicho primer electrodo (11).

15 13. El proceso de acuerdo con la reivindicación 12, en el que formar una estructura de electrodos (10) comprende además conectar dichos dos segundos electrodos (12) a una señal de referencia, y conectar dicho primer electrodo (11) a una entrada de señal de accionamiento eléctrico de dicho variador óptico de frecuencia (1).



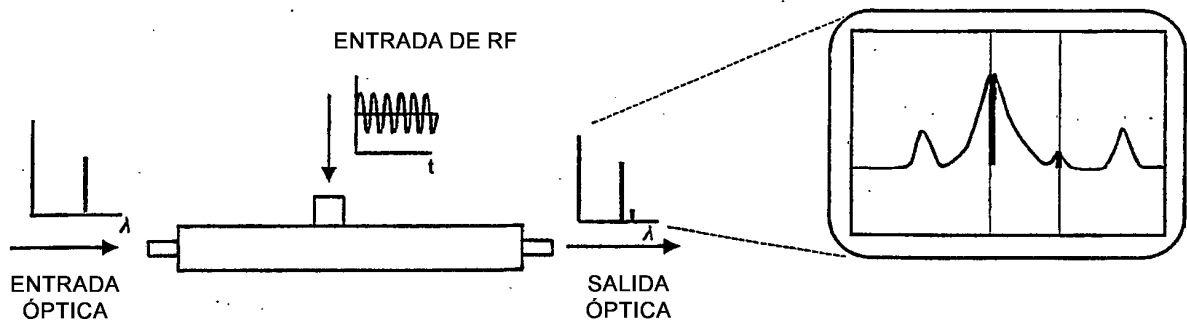


Fig.1

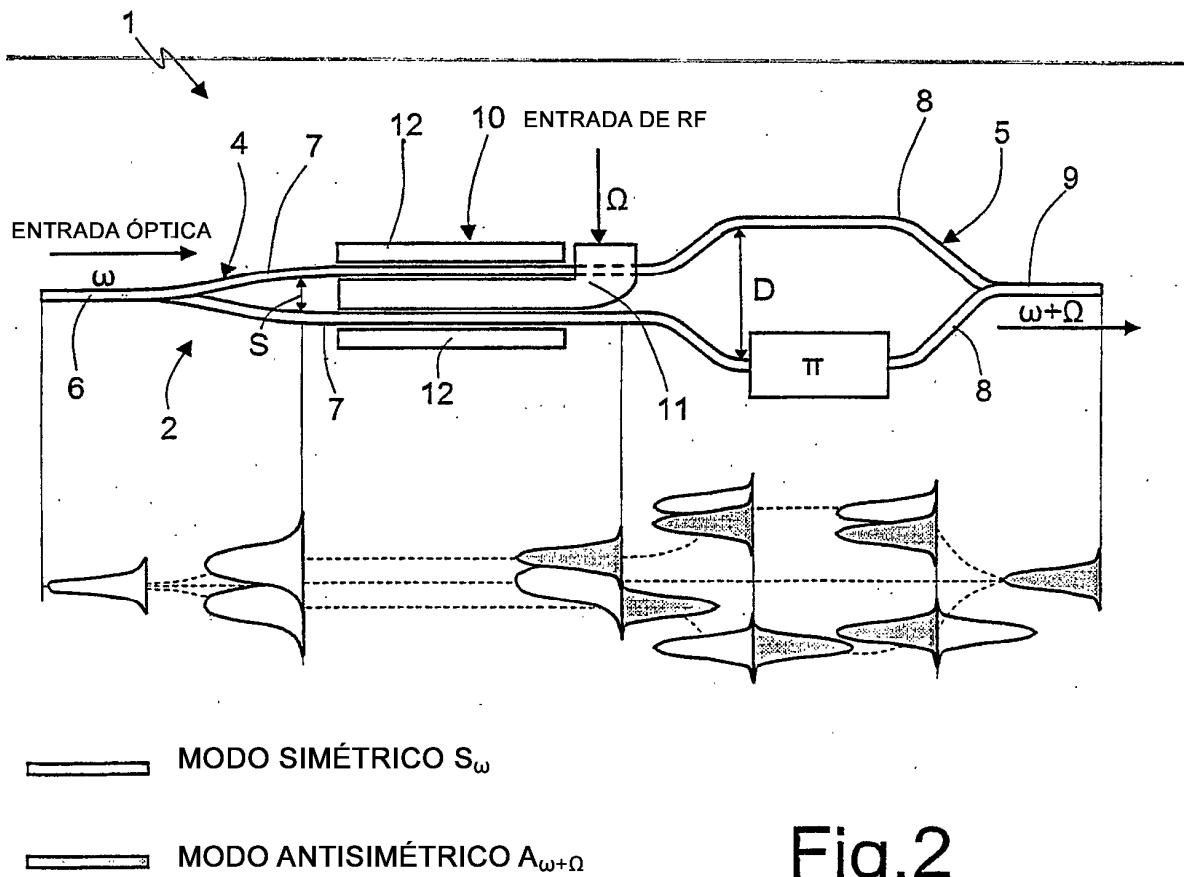


Fig.2

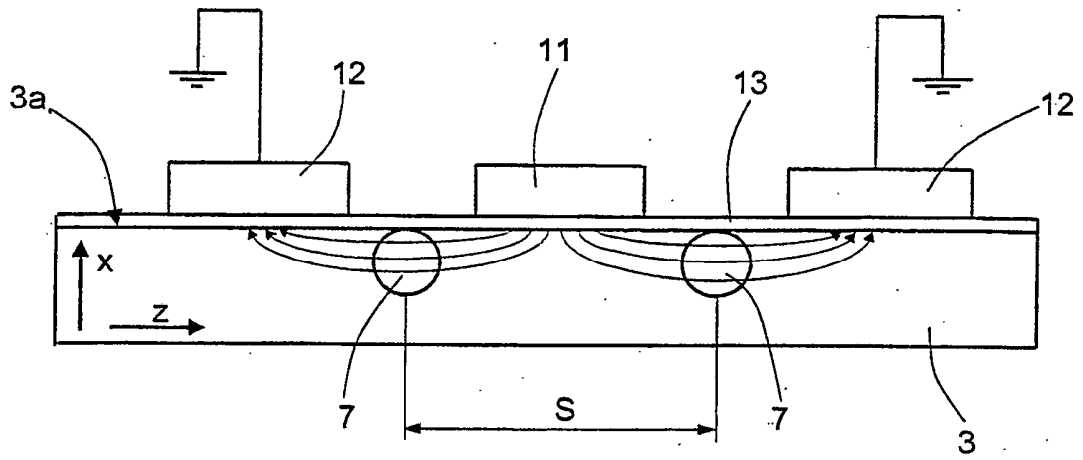


Fig.3

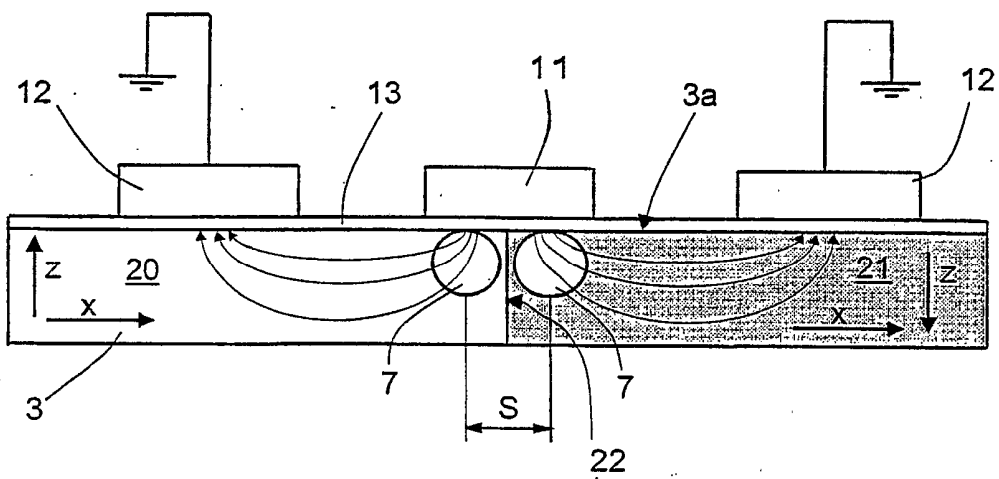


Fig.4