

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 694 249**

21 Número de solicitud: 201831055

51 Int. Cl.:

G02B 6/26 (2006.01)

G02B 6/287 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

31.10.2018

43 Fecha de publicación de la solicitud:

19.12.2018

71 Solicitantes:

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
(100.0%)**

**INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA -I2T,
CAMINO DE VERA, S/N EDIF. NEXUS, PTA 3
46022 VALENCIA ES**

72 Inventor/es:

**CAPMANY FRANCOY, José;
GASULLA MESTRE, Ivana y
PÉREZ LÓPEZ, Daniel**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

54 Título: **ACOPLADOR DIRECCIONAL FOTÓNICO CON SINTONIZACIÓN INDEPENDIENTE DE FACTOR DE ACOPLO Y DESFASE**

57 Resumen:

Acoplador direccional fotónico con sintonización independiente de factor de acoplo y desfase.

La presente invención divulga un acoplador direccional fotónico (1) con sintonización independiente de factor de acoplo y desfase. El acoplador comprende: dos guías de ondas (4, 5), con respectivos índices de propagación " β_1 , β_2 ", sobre las que se sitúan sendos desfasadores (6, 7) configurados para modificar los coeficientes de propagación. Ambos desfasadores están configurados de tal forma que mediante la modificación independiente (diferencial o única) de los coeficientes de propagación, se sintoniza el factor de acoplo de potencia (K) entre una señal a la entrada (2a o 2b) y las señales a las salidas (3b y 3a), y mediante la modificación igualitaria y simultánea de los coeficientes de propagación, se sintoniza el desfase común en las señales ópticas a las salidas (3a, 3b). Mediante un tercer desfasador (15) se puede resintonizar el desfase a la entrada/salida de una de las guías de ondas. Especial interés en circuitos PIC, resonadores acoplados, interferómetro Mach-Zehnder y estructuras de mallas.

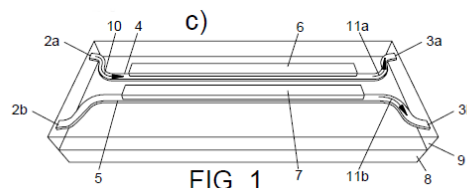


FIG. 1

DESCRIPCIÓN**ACOPLADOR DIRECCIONAL FOTÓNICO CON SINTONIZACIÓN INDEPENDIENTE
DE FACTOR DE ACOPLO Y DESFASE**

5

Objeto de la invención

El objetivo de la presente invención es poder permitir una sintonización independiente del factor de acoplo y de la fase a la salida de acopladores direccionales fotónicos (TDC – Tunable Directional Couplers).

10 El campo técnico de la invención es el campo de la fotónica, los circuitos ópticos integrados (“PIC” – “Photonic Integrated Circuits”) y dentro de los mismos, los acopladores direccionales fotónicos.

Las aplicaciones de la presente invención se encuentran en muchas funcionalidades fotónicas y RF-fotónicas tales como: Circuitos integrados fotónicos reconfigurables / redes ópticas; Filtrado óptico RF-Fotónico; Redes de conformación de haces fotónicos para antenas de matriz en fase sintonizable; Generación y conformación de formas de onda arbitrarias; Conversión analógica a digital; radar fotónico; Distribución de señal controlada; Instrumentación fotónica avanzada; Osciladores opto-electrónicos y Computación cuántica.

20

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Los acopladores direccionales en el campo de la fotónica son ampliamente conocidos y utilizados en circuitos ópticos integrados. Se utilizan para dividir la señal desde uno de sus dos puertos de entrada a dos puertos de salida con un porcentaje de acoplo concreto a cada puerto de manera fija. También dentro del estado de la técnica se encuentran los acopladores direccionales sintonizables. Estos permiten modificar el coeficiente de acoplo mediante la aplicación de un desfase en una de las dos guías que componen el dispositivo (o aplicando un desfase diferencial entre ellas). Un ejemplo de este tipo de dispositivo se divulga en la solicitud de patente con número de publicación US5375180A.

30

Los acopladores direccionales fotónicos básicos así como los que permiten la sintonización del coeficiente de acoplo, imponen a la salida un desfase fijo dependiente del coeficiente de acoplo. Dado que estos elementos suelen ir integrados en estructuras que explotan la interferencia entre señales como cavidades o interferómetros multipuerto, la sintonización de la fase resulta tan esencial como el coeficiente de acoplo para la correcta optimización y configuración de los circuitos. Es decir, a medida que se modifica la señal suprimida (es decir, modifica el factor de

35

acoplo), se modifica la frecuencia (desfase del filtro) de la salida de forma indeseada. Y todo ello por la mera construcción de los acopladores direccionales.

Una de las soluciones del estado de la técnica divulgada en la solicitud de patente EP1259855A1 consiste en poner dos acopladores en serie donde cada acoplador tiene dos guías de ondas de anchuras diferentes e intercambiadas de tal manera que al conectarse una guía de ondas de un acoplador con otra guía de ondas de diferente anchura del siguiente acoplador, este último acoplador intentaba compensar de forma pasiva el desfase introducido por el primer acoplador.

Teniendo en cuenta el estado de la técnica actual, sería deseable poder obtener un dispositivo fotónico que supere los problemas anteriormente indicados del estado de la técnica.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Con el objetivo de eliminar la limitación principal del estado de la técnica, se propone un diseño de un acoplador direccional fotónico capaz de sintonizar de manera independiente el coeficiente de acoplo y la fase a la salida del acoplador. Para ello, se emplea una arquitectura en la que, mediante dos desfasadores ópticos, las condiciones de propagación de la señal de ambos brazos (guías de ondas) se puede modificar. De este modo, el desfase diferencial (o único) modifica el coeficiente de acoplo y un desfase común (o equitativo) en ambos brazos permite configurar el desfase global que aplica el acoplador direccional fotónico.

Además de su aplicación en circuitos clásicos, el acoplador direccional fotónico de la presente invención resulta esencial para la generación de circuitos ópticos mallados.

Para entender mejor el acoplador direccional fotónico de la presente invención, a continuación se expone la teoría de modos acoplados. El campo óptico a la salida de un acoplador direccional fotónico es:

$$\begin{aligned}
 A_1(z) &= e^{j\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right)z} \left\{ \begin{aligned} &\cos\left[\frac{z}{2}\sqrt{\Delta^2 + 4|\kappa|^2}\right] \\ &-j\frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + 4|\kappa|^2}}\sin\left[\frac{z}{2}\sqrt{\Delta^2 + 4|\kappa|^2}\right] \end{aligned} \right\} \\
 A_2(z) &= e^{j\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right)z} \frac{2j\kappa}{\sqrt{\Delta^2 + 4|\kappa|^2}}\sin\left[\frac{z}{2}\sqrt{\Delta^2 + 4|\kappa|^2}\right],
 \end{aligned} \tag{1}$$

donde “ β_1 ” y “ β_2 ” son los coeficientes de propagación de los modos en las dos guías de ondas; “ κ ” es el coeficiente de acoplamiento entre modos; “ z ” es la variable que

define la longitud de acoplamiento y “ Δ ” es la diferencia entre los coeficientes de propagación $\beta_1 - \beta_2$. El argumento y la fase de cada uno de los vectores anteriores son:

$$|A_1(z)|^2 = \left(\cos^2 \left[\frac{z}{2} \sqrt{\Delta^2 + 4|\kappa|^2} \right] + \frac{\Delta^2}{\Delta^2 + 4|\kappa|^2} \sin^2 \left[\frac{z}{2} \sqrt{\Delta^2 + 4|\kappa|^2} \right] \right) = \alpha_{TBU} \sqrt{1 - K^2} \quad (2)$$

$$|A_2(z)|^2 = \frac{4|\kappa|^2}{\Delta^2 + 4|\kappa|^2} \sin^2 \left[\frac{z}{2} \sqrt{\Delta^2 + 4|\kappa|^2} \right] = \alpha_{TBU} K,$$

$$\text{Arg}[A_1(z)] = \left(\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \right) z - \tan^{-1} \left\{ \frac{\Delta \tan \left[\frac{z}{2} \sqrt{\Delta^2 + 4|\kappa|^2} \right]}{\sqrt{\Delta^2 + 4|\kappa|^2}} \right\} \right) \quad (3)$$

$$\text{Arg}[A_2(z)] = \left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \right) z + \frac{\pi}{2},$$

Hay que tener en cuenta que los coeficientes de propagación “ β_1 ” y “ β_2 ” incluyen una parte real y una parte imaginaria, la cual indica las pérdidas. Adicionalmente, se puede separar la contribución estática y la contribución activa. La contribución estática (referenciada con subíndice “ p ”) da cuenta del comportamiento pasivo de las guías de ondas y está determinado por la propia fabricación del acoplador direccional fotónico. La contribución activa es la que proviene de cada desfasador sobre cada guía de ondas (β_a) dada por un cambio en el índice efectivo Δn_{eff} .

Teniendo en cuenta lo anterior, los coeficientes de propagación se pueden escribir de la siguiente forma si novedosamente incluimos dos desfasadores (uno por cada guía de ondas):

$$\beta_1 = (\beta_{1p} + \beta_{1a}) + j(\alpha_{1p} + \alpha_{1a}),$$

$$\beta_2 = (\beta_{2p} + \beta_{2a}) + j(\alpha_{2p} + \alpha_{2a}). \quad (4)$$

Si se vuelve a calcular “ Δ ” como la diferencia entre los coeficientes de propagación $\beta_1 - \beta_2$, se obtiene que:

$$\Delta = (\beta_{1p} - \beta_{2p}) + (\beta_{1a} - \beta_{2a}) + j(\alpha_{1p} - \alpha_{2p} + \alpha_{1a} - \alpha_{2a})$$

$$= \Delta_p + \Delta_a + j(\alpha_{1p} - \alpha_{2p} + \alpha_{1a} - \alpha_{2a}), \quad (5)$$

Es decir, que la diferencia “ Δ ” entre los coeficientes de propagación $\beta_1 - \beta_2$ depende de una “ Δ_p ” que es fija y predeterminada por la propia construcción del

acoplador direccional fotónico. Que la diferencia “ Δ ” también depende de la “ Δ_a ” que es función de los desfases.

Considerando las ecuaciones anteriores 1 a 4, se puede observar que modificando la constante de propagación β_a , se introduce un cambio de fase en una de las guías de ondas que cambian el coeficiente de acoplamiento K del acoplador direccional fotónico.

Volviendo sobre las ecuaciones anteriores, se puede observar que un incremento común en ambas guías de ondas, es decir $\beta_{1a} = \beta_{2a}$, conduce a un factor de acoplo fijo con una sintonización de la respuesta en fase. Es decir, una misma variación de los índices β_{1a} y β_{2a} permite sintonizar (aumentando o disminuyendo) la fase de forma independiente al factor de acoplo. Dicho de otro modo, el desfase diferencial o único modifica el coeficiente de acoplo y un desfase común o equitativo en ambos brazos (guías de ondas) permite configurar el desfase global que aplica la estructura. Esto junto con la forma de llevar a cabo la selección de β_{1a} y β_{2a} representa el avance de la invención sobre el estado de la técnica. Concretamente, la selección de β_{1a} y β_{2a} se lleva a cabo con un desfaseador por cada guía de ondas. Adicionalmente, los desfaseadores pueden estar asociados a otros elementos dependiendo de la tecnología de sintonización (termo-óptica, electro-óptica, de efectos capacitivos, sintonización óptica, etc...).

La longitud de acoplamiento depende del coeficiente de acoplamiento K, también llamado coeficiente de acoplamiento en potencia K. Para acopladores direccionales fotónicos pasivos donde ambas guías de ondas son iguales, es decir $\Delta\beta_{1p} = \Delta\beta_{2p}$, la longitud de acoplamiento debe ser igual a:

$$L_{co} = \frac{\pi}{2|K|}, \quad (6)$$

Si las guías de ondas paralelas son diferentes, $\Delta\beta_{1p} \neq \Delta\beta_{2p}$, entonces se debe imponer un factor de corrección a la longitud de acoplamiento, resultando en:

$$L_{co,2} = \frac{L_{co}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\beta L_{co}}{\pi}\right)^2 + 1}}, \quad (7)$$

Para acopladores 3-dB, la longitud del acoplador es la mitad de la longitud de acoplamiento total.

Teniendo en cuenta lo anterior, en un primer aspecto de la presente invención se divulga un acoplador direccional fotónico con sintonización independiente de factor de acoplo y desfase, que comprende:

- una primera guía de ondas con índice de propagación β_1 y una segunda guía de ondas con índice de propagación β_2 ;

- una entrada y una salida para la primera guía de ondas, y una entrada y una salida para la segunda guía de ondas;
- un primer desfasador, situado a una distancia predeterminada de la primera guía de ondas, configurado para modificar el coeficiente de propagación β_1 de la primera guía de ondas;
- un segundo desfasador, situado a una distancia predeterminada de la segunda guía de ondas, configurado para modificar el coeficiente de propagación β_2 de la segunda guía de ondas;

estando el primer desfasador y el segundo desfasador configurados de tal forma que mediante la modificación independiente (diferencial o única) del coeficiente de propagación β_1 y del coeficiente de propagación β_2 , respectivamente, se sintoniza un factor de acoplo "K" entre una señal óptica a la entrada de una de las guías de ondas y unas señales ópticas a las salidas de ambas guías de ondas, y mediante la modificación igualitaria y simultánea del coeficiente de propagación β_1 y del coeficiente de propagación β_2 , respectivamente, se sintoniza el desfase común en las señales ópticas a las salidas de ambas guías de ondas.

En este punto, se recuerda que, para un acoplador direccional compuesto por dos guías de ondas y según se conoce en el estado de la técnica, una señal de "entrada" a la entrada de una guía de ondas se propagará por dicha guía de ondas dando lugar a dos señales, la señal "directa" y la señal "acoplada". La señal directa es la proporción de la señal de entrada que se encuentra en la salida perteneciente a la guía de entrada. La señal acoplada es una segunda señal que se genera en la otra guía de ondas por acción de los campos eléctricos y magnéticos generados por la señal de entrada propagándose por su correspondiente guía de ondas. El factor de acoplo "K" establece la relación entre la potencia de la señal acoplada y la señal de entrada. Así, un factor de acoplo "K" de 0,6 implica que la potencia de la señal acoplada tendrá 60% de la potencia de la señal de entrada, y por tanto, la señal directa tendrá una potencia del 40% de la señal de entrada (se supone idealmente que no hay pérdidas).

La modificación independiente del coeficiente de propagación β_1 y del coeficiente de propagación β_2 se pueden modificar de forma independiente o única, es decir, se puede obtener el mismo factor de acoplo "K" si, por ejemplo se modifica β_1 en un valor "0" (no hay modificación) y se modifica β_2 en un valor "7" (modificación única) que si se modifica β_1 en un valor "3" y se modifica β_2 en un valor "10" (modificación diferencial – se mantiene la diferencia de "7"). En cambio, el desfase en los ejemplos antes indicados es diferente, es decir, para β_1 con un valor "0" y para β_2 con un valor "7" y

por otro lado, para β_1 con un valor "3" y β_2 con un valor "10", se obtiene el mismo factor de acoplo "K" pero dos desfases diferentes.

En una realización de la invención, el acoplador direccional fotónico, adicionalmente comprende un sustrato y un revestimiento. El revestimiento se sitúa sobre el sustrato, el cual interiormente comprende al menos la primera guía de ondas y la segunda guía de ondas. Además, el primer desfasador y el segundo desfasador pueden estar situados sobre el revestimiento.

En otra realización de la invención, el acoplador direccional fotónico, adicionalmente puede comprender un tercer desfasador, situado a la entrada o a la salida de cualquiera de las guías de ondas de acceso al acoplador de guía de ondas, configurado para modificar el desfase correspondiente al puerto (entrada o salida) en el que ha sido situado el tercer desfasador. De esta manera si el tercer desfasador se sitúa a la entrada (puerto de entrada del acoplador direccional fotónico) de cualquiera de las guías de ondas, el tercer desfasador introduce un desfase anterior al desfase introducido por el primer desfasador y por el segundo desfasador. Si el tercer desfasador se sitúa a la salida (puerto de salida del acoplador direccional fotónico) de cualquiera de las guías de ondas, el tercer desfasador introduce un desfase posterior al desfase introducido por el primer desfasador y por el segundo desfasador. Este tercer desfasador es ventajoso porque puede realizar un ajuste del desfase anterior o posterior al que se obtiene por el primer desfasador y por el segundo desfasador, dando opción de obtener valores de desfase deseados que no se podrían llegar a obtener con sólo la acción conjunta del primer desfasador y del segundo desfasador. En otra realización de la invención, el acoplador direccional fotónico, adicionalmente puede comprender un microprocesador conectado al primer desfasador y al segundo desfasador para la activación de los mismos, donde el microprocesador calcula el cambio en el coeficiente de propagación β_1 de la primera guía de ondas para obtener el factor de acoplo y donde dicho microprocesador también calcula la variación simultánea del coeficiente de propagación β_1 de la primera guía de ondas y coeficiente de propagación β_2 de la segunda guía de ondas para obtener el desfase. Opcionalmente, el microprocesador puede estar adicionalmente conectado al tercer desfasador para la activación del mismo. Una vez calculados ambos coeficientes de propagación con los que se obtiene el factor de acoplo y el desfase deseados, el microprocesador activará los desfasadores que actuarán sobre las guías de ondas hasta que los coeficientes de propagación β_1 y β_2 se correspondan con los calculados por el microprocesador.

En otra realización de la invención, el microprocesador puede estar adicionalmente conectado a monitores de potencia óptica total o parcial a una o ambas

salidas del acoplador direccional fotónico para la lectura y cálculo del factor de acoplo “K” actual (instantáneo). Los monitores de potencia óptica pueden ser de potencia óptica total o parcial.

En un segundo aspecto de la invención, se divulgan diferentes usos del acoplador direccional fotónico del primer aspecto de la invención. Por tanto, se divulga el uso del acoplador direccional fotónico definido en una cualquiera de las realizaciones del primer aspecto de la invención en circuitos PIC (Controlador programable de interrupciones), en resonadores acoplados, en un interferómetro Mach-Zehnder y en estructuras fotónicas seleccionadas entre estructuras triangulares, cuadradas, hexagonales y de mallas.

Las ventajas del acoplador direccional fotónico de la presente invención:

- Puede proporcionar operaciones de división del haz de luz con valores de acoplamiento reconfigurables así como permitir una configuración independiente del cambio de fase.
- Se puede llevar a cabo por elementos que se pueden integrar en un chip, y por tanto, es totalmente integrable.
- Si se implementa como Unidad Básica Sintonizable (Tunable Basic Unit) en estructuras de mallas de guías de ondas, permite la optimización de las mallas en términos de pérdidas de potencia y resolución espacial. Esto tiene un impacto directo sobre el rendimiento de toda la malla, permitiendo la realización de dispositivos más complejos y operaciones en frecuencias más altas.
- Puede ser programado para proporcionar diseños de filtros ópticos plenamente reconfigurables y sintonizables, y corregir o superar errores de fabricación.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

FIG. 1.- Muestra un ejemplo de realización de un acoplador direccional fotónico según la presente invención en sección (Fig. 1a), en planta (Fig. 1b) y en 3D (Fig. 1c).

FIG. 2a.- Muestra la variación del factor de acoplo en función del incremento igualitario en los coeficientes de propagación de las guías de ondas con el acoplador direccional fotónico de la presente invención.

FIG. 2b.- Muestra la variación del desfase en función del incremento igualitario en los coeficientes de propagación de las guías de ondas con el acoplador direccional fotónico de la presente invención.

FIG. 3a.- Muestra dos resonadores acoplados mediante el acoplador direccional fotónico de la presente invención.

FIG. 3b.- Muestra la aplicación del acoplador direccional fotónico de la presente invención en un interferómetro Mach-Zehnder.

FIGs. 4a a 4d.- Muestra diferentes estructuras en las que se puede aplicar el acoplador direccional fotónico de la presente invención. Fig. 4a: triangular, Fig. 4b: cuadrada; Fig. 4c: hexagonal y Fig. 4d: de mallas.

FIG. 5.- Muestra el acoplador direccional fotónico de la presente invención con tres desfasadores, donde uno de ellos se encuentra a la entrada o a la salida de las guías de ondas.

FIG. 6.- Muestra una realización de laboratorio para mediciones experimentales del acoplador direccional fotónico de la presente invención.

DESCRIPCIÓN DE UNA FORMA DE REALIZACIÓN DE LA INVENCION

A continuación se detalla una forma de realización de la invención de acuerdo a las figuras mostradas.

La figura 1 muestra un ejemplo de realización de un acoplador direccional fotónico según la presente invención donde se observa un desfasador por cada guía de ondas. Concretamente, la figura 1c muestra el acoplador direccional fotónico 1 que comprende dos guías de ondas 4 y 5 dentro de un revestimiento 9, el cual se sitúa sobre el sustrato 8. Sobre cada una de las guías de ondas se sitúan sendos desfasadores 6 y 7. Las guías de ondas 4 y 5 tienen sus entradas 2a y 2b, respectivamente, y sus salidas 3a y 3b, respectivamente. Cualquiera de las entradas 2a y 2b puede estar conectada a una fuente de luz que suministrará una señal de entrada 10 con una potencia óptica determinada. Para el caso concreto en que la entrada 2a esté alimentada por la señal de entrada 10, a la salida 3a se obtendrá la señal directa 11a y a la salida 3b se obtendrá la señal acoplada 11b cuya potencia y fase dependerán del factor de acoplo K con la señal de entrada, tal y como se conoce en el estado de la técnica (estando los desfasadores desconectados). En la figura 1b se muestra una vista en planta del acoplador direccional fotónico 1 pero sólo se muestran las guías de ondas 4 y 5 y los desfasadores 6 y 7. En la figura 1b también se muestra cómo depende el acoplamiento $A_i(z)$ entre señales propagándose por las guías de ondas entre $z=0$ y $z=L_c$. Por último, en la figura 1a se muestra una vista en sección del acoplador direccional fotónico 1 en el que se muestra el sustrato 8, sobre el que se deposita el revestimiento 9 que incluye las dos guías de ondas 5 y 6 dispuestas paralelamente y separadas una distancia "g", y finalmente, sobre el revestimiento 9, se sitúan los desfasadores 6 y 7 de anchura "w" paralelos entre sí y distanciados una distancia "d". En el caso particular del acoplador direccional fotónico mostrado en la figura 1, la unión virtual de las guías de ondas 5 y 6 formaría un plano

paralelo al plano virtual formado por los desfasadores 6 y 7. Como se observa en la figura 1a, cada desfasador tiene un radio de acción 12a, 12b sobre la guía de ondas sobre la que se sitúa.

El efecto de cada desfasador sobre su correspondiente guía de ondas se conoce como “sintonización” y actualmente existen distintas tecnologías de sintonización. El objetivo de las tecnologías de sintonización es modificar la fase de la señal (óptica) que circula por la guía de ondas. Este efecto se consigue mediante la modificación de las propiedades ópticas de la guía de ondas. La gran mayoría de elementos de sintonización requieren alimentación electrónica que ha de ser guiada hasta el dispositivo integrado. Dependiendo de la física que hay detrás del efecto, algunos ejemplos de sintonización son: “termo-ópticos”: el desfase se produce mediante la modificación local de la temperatura. Este efecto se puede producir haciendo pasar una corriente por una capa metálica cercana al núcleo de la guía y liberando así calor; electro-ópticos: El paso de corriente eléctrica por la propia guía produce una modificación en sus propiedades de propagación produciendo el desfase deseado; “efectos capacitivos, electromecánicos, MEMs.”: se modifican las propiedades geométricas de la guía o la presión en alguno de sus materiales para alterar/producir un desfase; “sintonización óptica”: se utiliza una señal óptica de bombeo o sintonización para que interfiera con la señal objetivo.

Respecto de los valores de “g” o “w” antes indicados, estos dependerán de varios factores como las tecnologías de sintonización previamente descritas y/o de las tecnologías de fabricación (“Silicon on Insulator”, “Silica”, “Silicon nitride”, “Indium Phosphore”, “Lithium Niobate on Silicon”). Valores típicos de “w” y “g” se sitúan entre 0,6 μm y 1,6 μm .

Con la configuración mostrada en la figura 1 y para cualquier tecnología de sintonización previamente descrita, el acoplador direccional fotónico 1 de la presente invención consigue variar los coeficientes de propagación β_1 y β_2 de las guías de ondas mediante la acción de los desfasadores 6 y 7 para sintonizar el factor de acoplo (K) y el desfase de forma independiente entre las señales que se propagan por las guías de ondas 4 y 5.

Para conseguir el valor del factor de acoplo deseado entre la señal transmitida y la señal acoplada, basta con sintonizar (cambiar el coeficiente de propagación β_i) de una de las guías de ondas de tal manera que se genere una diferencia entre los coeficientes de propagación de las guías de ondas. Dicho de otro modo, si se mantiene la diferencia entre los coeficientes de propagación constante, el coeficiente de propagación se mantiene constante. Por otro lado, el cambio en el coeficiente de propagación β_i conlleva un cambio de fase (desfase) de la señal que circula por la guía

de ondas. Si se desea un desfase concreto, diferente al que se genera al obtener el factor de acoplo deseado, bastaría con modificar los coeficientes de propagación β_i en la misma proporción.

Para llevar a cabo lo anterior, los desfasadores 6 y 7 se pueden conectar a un microprocesador (no mostrado) que será el encargado de calcular el cambio en el coeficiente de propagación β_1 de la guía de ondas 4 para obtener el factor de acoplo deseado y también de calcular la variación simultánea del coeficiente de propagación β_1 de la guía de ondas 4 y coeficiente de propagación β_2 de la guía de ondas 5. Una vez calculados ambos coeficientes de propagación con los que se obtiene el factor de acoplo y el desfase deseados, el microprocesador activará los desfasadores 6 y 7 que actuarán sobre las guías de ondas 4 y 5 hasta que los coeficientes de propagación β_1 y β_2 se correspondan con los calculados por el microprocesador. Adicionalmente, el microprocesador puede estar conectado a un monitor de potencia óptica (no mostrado), el cual se conectan a una o ambas salidas del acoplador direccional fotónico para la lectura y cálculo del factor de acoplo “K” de forma instantánea.

En las figuras 2a y 2b se puede observar que, mediante el acoplador direccional fotónico de la presente invención, el factor de acoplo (Coupling Factor (K)) se mantiene constante a medida que aumenta $\Delta n_{\text{eff,common}}$ (figura 2a) y que el desfase crece a medida que aumenta $\Delta n_{\text{eff,common}}$ (figura 2b). Recordemos que $n_{\text{eff}} = (\beta_a + \beta_p)2\pi/\lambda$, y por tanto, $\Delta n_{\text{eff,common}} = [((\beta_{a1} + \beta_{p1})2\pi/\lambda) - ((\beta_{a2} + \beta_{p2})2\pi/\lambda)]$. Por tanto, los cambios de β_1 y β_2 modifican el valor de β_a (parte activa).

En las figuras 3a y 3b, se muestran aplicaciones del acoplador direccional fotónico de la presente invención a diseños de circuitos PIC (del inglés, Circuito Integrado Fotónico) típicos. En concreto, la figuras 3a muestra el acoplador direccional fotónico aplicado a dos resonadores 13a, 13b acoplados, y la figura 3b muestra el acoplador direccional fotónico aplicado a un interferómetro Mach-Zehnder 14. En ambos casos, el factor de acoplo puede ser programado accediendo y modificando la alimentación de cada desfasador. El desfasador que típicamente se encuentra en uno de los brazos del Mach-Zehnder puede ser, por ejemplo sustituido si contamos con el tercer acoplador en el diseño del TDC.

Otra aplicación de gran relevancia del acoplador direccional fotónico en PICs particularmente interesante es el campo de las “mallas de guías de ondas”. De manera similar al modo de operación de las FPGAs (matriz de puertas programables o “*field-programmable gate array*” en inglés), los PIC programables que implementan divisores de haz multipuerto pueden configurarse mediante la discretización de circuitos convencionales en una estructura de mallas de guías de ondas prefabricadas de pares de guías de ondas acopladas, conocidas como Unidades Básicas Sintonizables (TBU).

Al configurar cada TBU, se puede lograr una interferencia constructiva, destructiva o parcial en cada puerto de salida complementario, lo que lleva al enrutamiento de la señal y la definición de la topología del circuito y los parámetros de diseño. Si bien sacrifican el área, el consumo de energía y la ganancia óptica, estos circuitos proporcionan una versatilidad y flexibilidad sin precedentes, lo que permite aplicaciones que no son posibles en un PIC estándar de aplicaciones específicas. Las Figuras 4a a 4d ilustran diferentes combinaciones y topologías de mallas de guías de ondas que se han propuesto en la literatura para este propósito, donde se ha incluido el acoplador direccional fotónico de la presente invención como TBU (“Unidad Básica Sintonizable”). Concretamente, la figura 4a muestra una estructura fotónica de estructura triangular 16, la figura 4b de estructura cuadrada 17, la figura 4c de estructura hexagonal 18 y la figura 4d de estructura de mallas 19 con flechas indicando la entrada y la salida.

Para programar extensos y complejos sistemas basados en estructuras de mallas de guías de ondas, las pérdidas moderadas de TBU (0.25 dB / TBU) degradan seriamente el rendimiento general del circuito. Para superar esta limitación, la incorporación del acoplador direccional fotónico de la presente invención para reemplazar el diseño actual de TBU basado en dispositivos 3-dB MZI reduce las pérdidas en circuitos de mallas de guías de ondas programados, lo que lleva a cifras comparables a las de circuitos similares diseñados utilizando ASICs (del inglés “*Application Specific Photonic Integrated Circuits*”). Cuando se compara con el enfoque balanceado 3-dB MZI TBU, debido a la capacidad de miniaturización sin comprometer las pérdidas, también se encuentra una triple mejora en tiempo de la resolución.

Adicionalmente, el acoplador direccional fotónico de la presente invención puede tener un tercer desfasador 15 como se muestra en la figura 5. Con el tercer desfasador 15 se puede incluir un desfase adicional e independiente del introducido por los desfasadores 6 y 7 sobre cualquiera de las señales que se propaguen a la salida o a la entrada de cualquiera de las guías de ondas 4,5. De este modo, el tercer desfasador 15 puede situarse a la entrada (figuras 5a y 5c) o a la salida (figuras 5b y 5d) de las guías de ondas 4,5.

Por último, las figuras 6a y 6b muestran una fabricación de laboratorio para medir resultados experimentales del acoplador direccional fotónico de la presente invención. Se ha diseñado y fabricado bajo un Multi Project Wafer (MPW) ejecutando un acoplador direccional fotónico como el de la presente invención en una plataforma de nitruro de silicio, ilustrado en la Fig. 6a. Para las mediciones, se ha empleado un barrido láser sintonizable de 1520 a 1620 nm. seguido de un controlador de polarización antes de acceder al chip por medio de fibras ópticas. Los datos fueron

adquiridos por un analizador de espectro óptico para cada valor de potencia eléctrica programado.

En este caso, se empleó una guía de onda mono-modo de 1 μm de ancho y 300 nm de altura para propagar un campo TE Transversal Eléctrico). El espacio entre las guías de ondas (g) se ajustó a 1,5 μm , lo que llevó a una longitud de acoplamiento total teórica de 717 μm . Sin embargo, se decidió aumentar la longitud del acoplador final L a 1235 μm para aumentar la seguridad de los sintonizadores térmicos (desfasadores) y verificar el modelo analítico en lugar de encontrar un estado de cruce pasivo perfecto, y antes de proceder a una ronda de optimización. Para la capa de metal, se consideró una distancia entre desfasadores (d) de 2 μm . La diafonía óptica se mantuvo entre 15 y 21 dB para las operaciones cruzadas y directas, mientras se obtenía un ancho de banda > 5 nm para una uniformidad de $\pm 2\%$. El exceso de pérdida total fue insignificante y se estima que está por debajo de 0.1 dB. La Fig. 6b ilustra el cambio en el factor de acoplo en potencia K frente a la corriente eléctrica aplicada en cuatro longitudes de onda diferentes. El modelo fue validado y predice errores de fabricación en el rango de ancho de 15 nm y variación de separación de 70 nm.

Para el acoplador direccional fotónico mostrado en la figura 6a, el consumo de energía necesario para la reconfigurabilidad del factor de acoplamiento de 1 a 0 es mayor que en un enfoque MZI convencional si se emplea un mecanismo de ajuste térmico (es decir, se mide un consumo de energía de 270 mW para el enfoque MZI y se estima 460 mW para el enfoque TDC en la misma plataforma de integración). La razón detrás de esto es la proximidad de las dos guías de onda y la interferencia térmica no optimizada resultante que afecta más seriamente al cambio de fase común más que al cambio de fase diferencial. Sin embargo, si la estructura se optimiza en consecuencia cambiando "d" y "g", el consumo de energía eléctrica puede reducirse considerablemente. Con el estado de la técnica, se podrían lograr TDC con capacidades de desplazamiento de fase de menos de 700 μm y 100 μm en nitruro de silicio y silicio en plataformas aislantes, respectivamente, que representan una disminución de más de tres veces la longitud con respecto a los enfoques TBU basados en MZI. Además, los mecanismos de ajuste alternativos como el efecto electromecánico parecen una opción prometedora para lograr TDC de baja potencia, baja pérdida y más cortos.

REIVINDICACIONES

1.- Acoplador direccional fotónico (1) con sintonización independiente de factor de
5 acoplo y desfase, que comprende:

- una primera guía de ondas (4) con índice de propagación β_1 y una segunda
guía de ondas (5) con índice de propagación β_2 ;
- una entrada (2a) y una salida (3a) en la primera guía de ondas (4) y una
entrada (2b) y una salida (3b) en la segunda guía de ondas (5);
- 10 • un primer desfasador (6), situado a una distancia predeterminada de la primera
guía de ondas (4), configurado para modificar el coeficiente de propagación β_1
de la primera guía de ondas (4);

caracterizado porque adicionalmente comprende:

- un segundo desfasador (7), situado a una distancia predeterminada de la
15 segunda guía de ondas (5), configurado para modificar el coeficiente de
propagación β_2 de la segunda guía de ondas (5);

estando el primer desfasador (6) y el segundo desfasador (7) configurados de tal
forma que mediante la modificación independiente del coeficiente de propagación β_1 y
del coeficiente de propagación β_2 , respectivamente, se sintoniza un factor de acoplo
20 (K) entre una señal óptica a la entrada (2a, 2b) de una de las guías de ondas (4,5) y
unas señales ópticas a las salidas (3a, 3b) de ambas guías de ondas (4,5), y
mediante la modificación igualitaria y simultánea del coeficiente de propagación β_1 y
del coeficiente de propagación β_2 , respectivamente, se sintoniza el desfase común en
las señales ópticas a las salidas (3a, 3b) de ambas guías de ondas (4,5).

25 2.- Acoplador direccional fotónico (1), según la reivindicación 1, caracterizado porque
adicionalmente comprende un sustrato (8) y un revestimiento (9); donde el
revestimiento (9) se sitúa sobre el sustrato (8), el cual interiormente comprende al
menos la primera guía de ondas (4) y la segunda guía de ondas (5); estando el primer
30 desfasador (6) y el segundo desfasador (7) situados sobre el revestimiento (9).

3.- Acoplador direccional fotónico (1), según la reivindicación 1 o 2, caracterizado
porque adicionalmente comprende un tercer desfasador (15), situado en una entrada
(2a, 2b) de una de las guías de ondas (4,5), donde el tercer desfasador (15) está
35 configurado para introducir un desfase anterior al desfase introducido por el primer
desfasador (6) y el segundo desfasador (7).

4.- Acoplador direccional fotónico (1), según la reivindicación 1 o 2, caracterizado porque adicionalmente comprende un tercer desfasador (15), situado en una salida (3a, 3b) de una de las guías de ondas (4,5), donde el tercer desfasador (15) está configurado para introducir un desfase posterior al desfase introducido por el primer desfasador (6) y el segundo desfasador (7).

5.- Acoplador direccional fotónico (1), según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque adicionalmente comprende un microprocesador conectado a primer desfasador (6) y al segundo desfasador (7) para la activación de los mismos, donde el microprocesador calcula el cambio en el coeficiente de propagación β_1 de la primera guía de ondas (4) para obtener el factor de acoplo K y donde dicho microprocesador también calcula la variación simultánea del coeficiente de propagación β_1 de la primera guía de ondas (4) y coeficiente de propagación β_2 de la segunda guía de ondas (5) para obtener el desfase.

6.- Acoplador direccional fotónico (1), según las reivindicaciones 4 y 5, caracterizado porque el microprocesador está adicionalmente conectado al tercer desfasador (15) para la activación del mismo.

7.- Acoplador direccional fotónico (1), según la reivindicación 5, caracterizado porque el microprocesador está adicionalmente conectado a monitores de potencia óptica a una o ambas salidas del acoplador direccional fotónico para la lectura y cálculo del factor de acoplo "K" actual.

8.- Uso del acoplador direccional fotónico definido en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en Circuitos Integrados Fotónicos "PIC".

9.- Uso del acoplador direccional fotónico definido en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en resonadores (13a, 13b) acoplados.

10.- Uso del acoplador direccional fotónico definido en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en un interferómetro Mach-Zehnder (14).

11.- Uso del acoplador direccional fotónico definido en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en estructuras fotónicas seleccionadas entre estructuras triangulares (16), cuadradas (17), hexagonales (18) y de mallas (19).

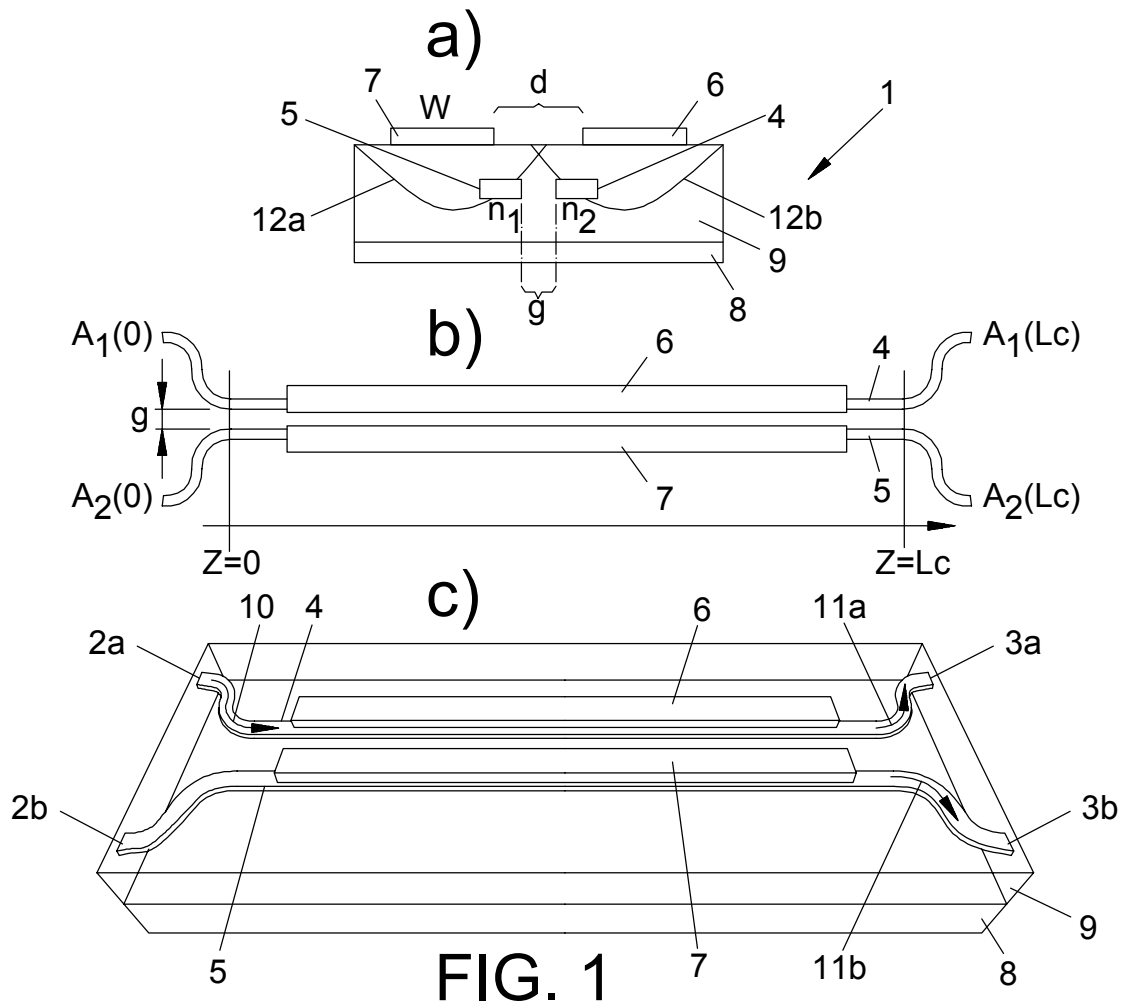


FIG. 1

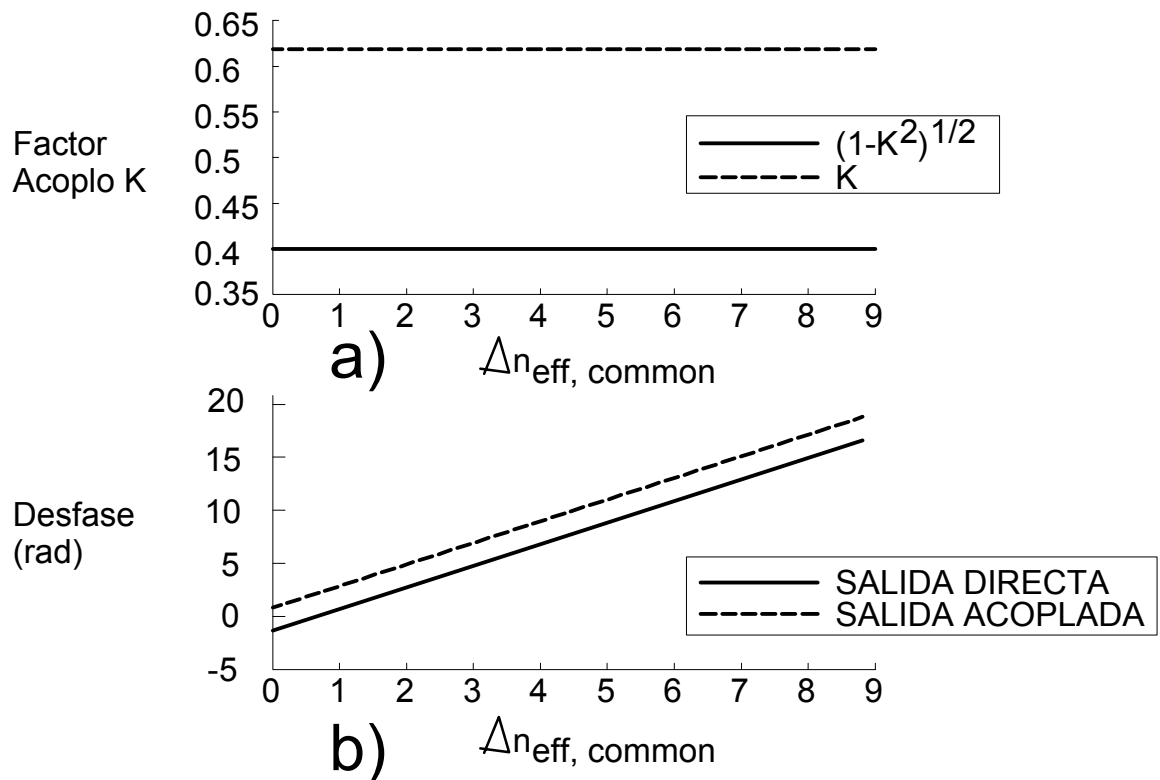


FIG. 2

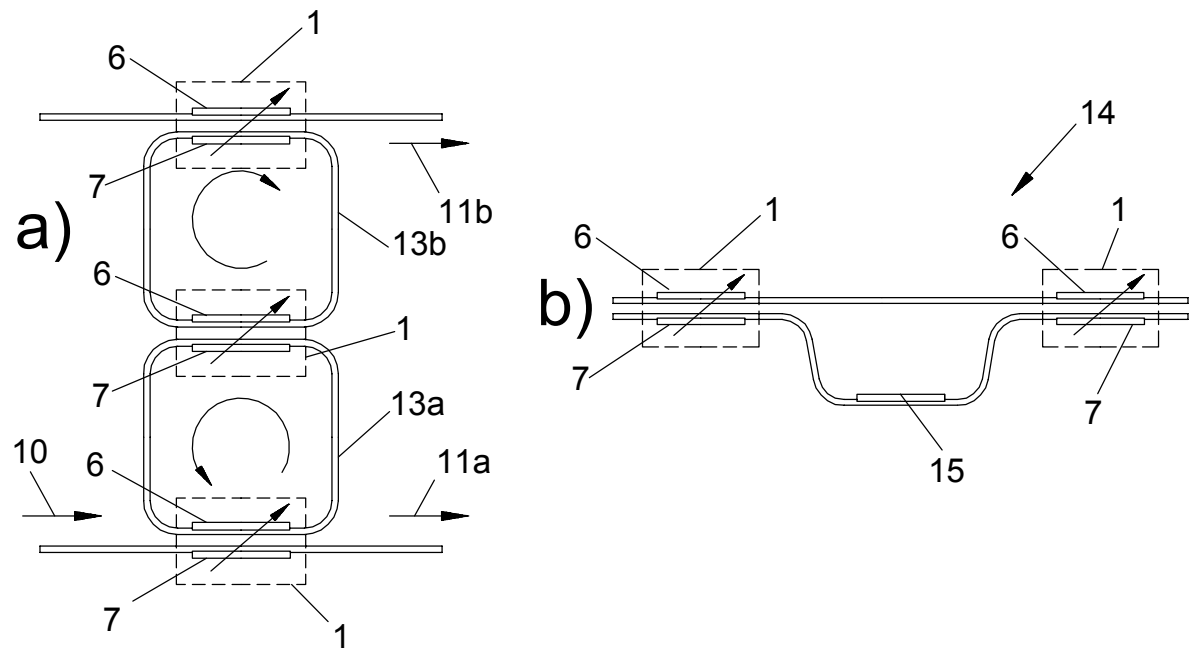


FIG. 3

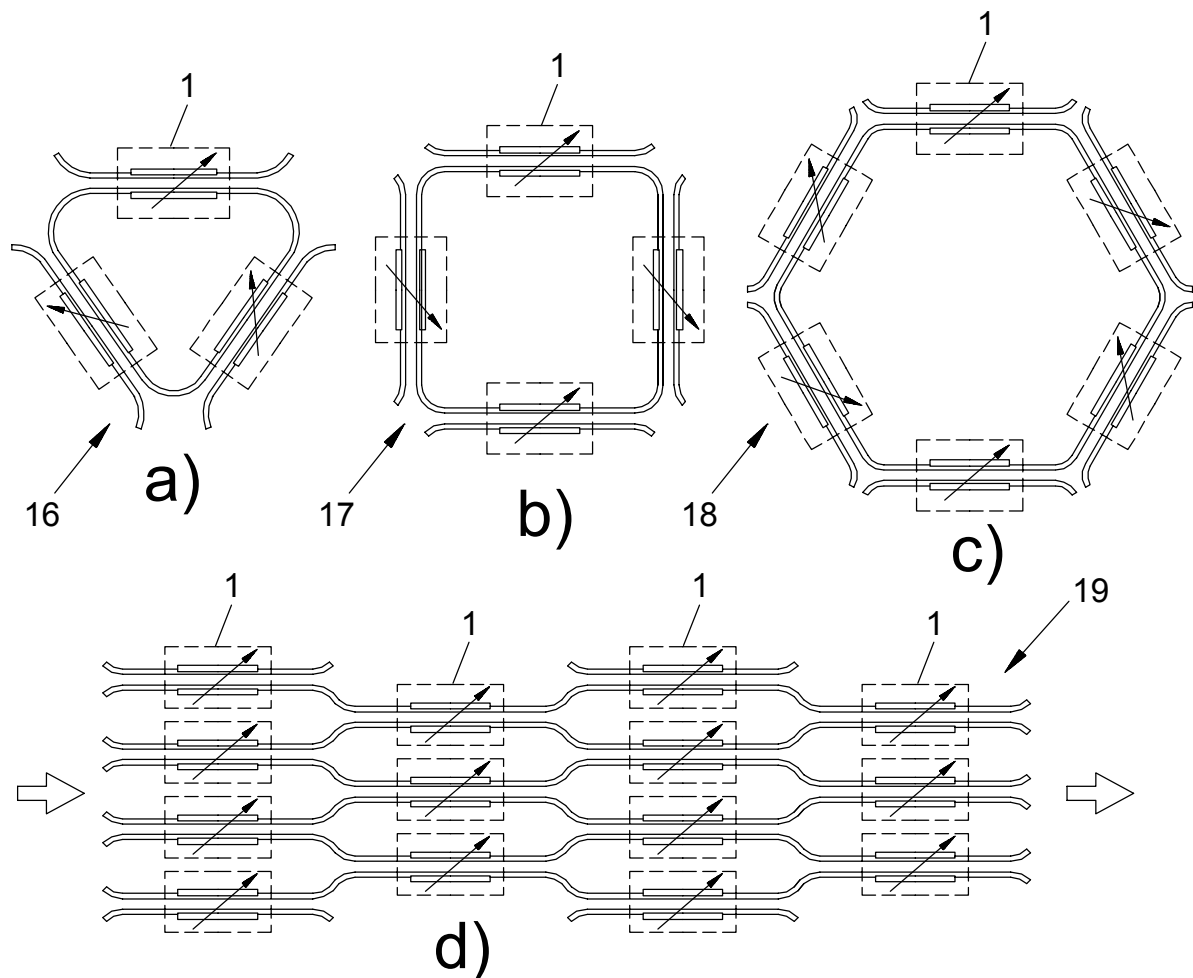
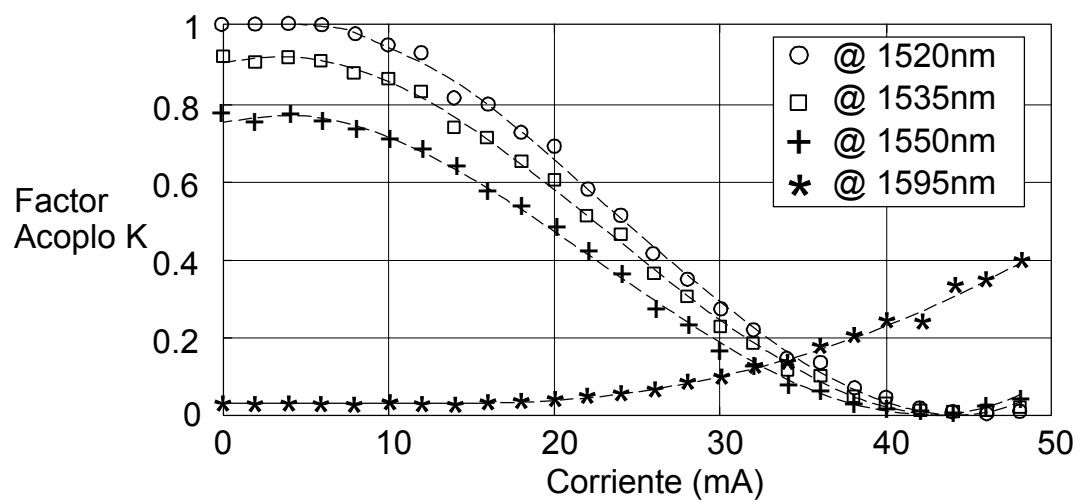
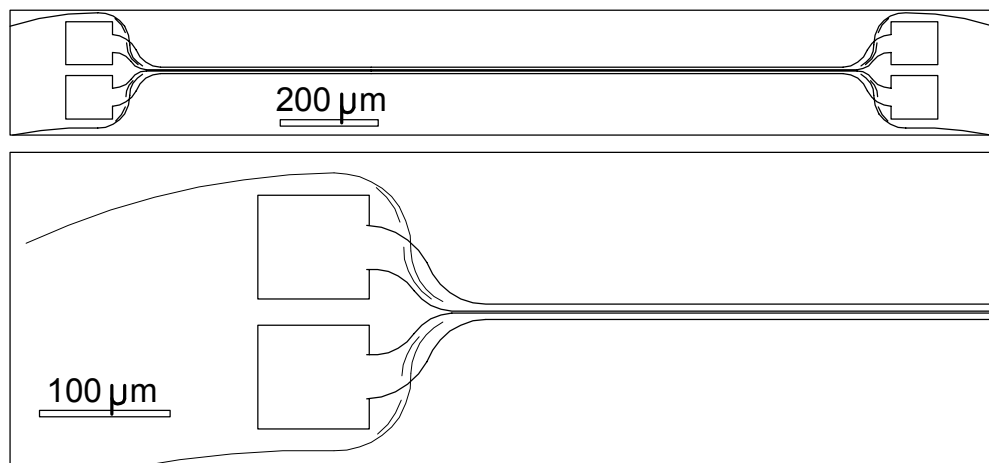
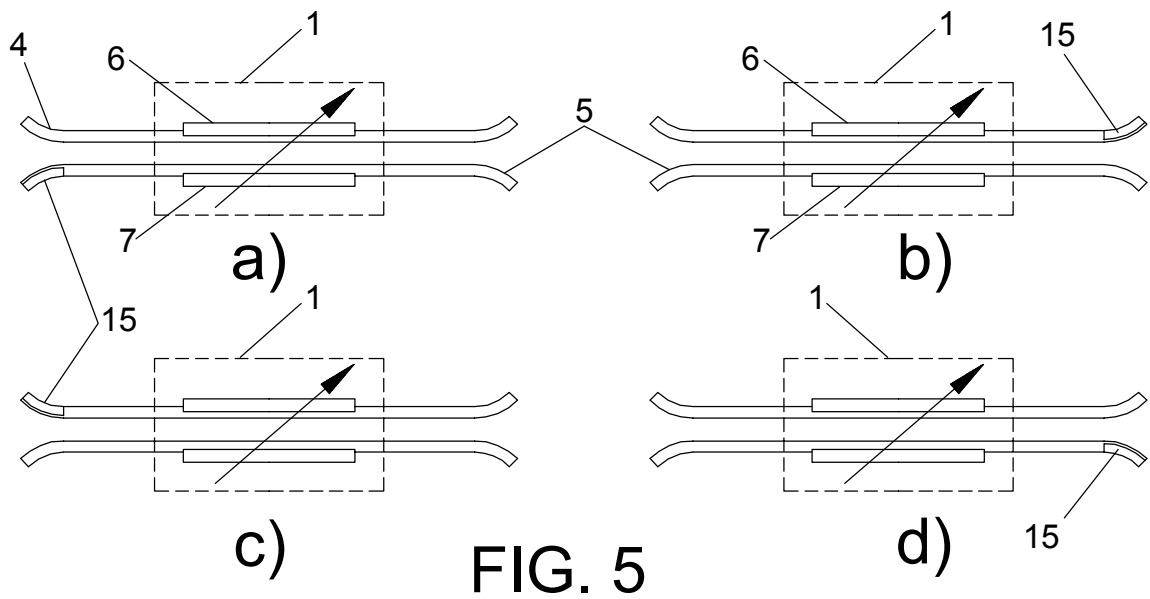


FIG. 4





- ②① N.º solicitud: 201831055
②② Fecha de presentación de la solicitud: 31.10.2018
③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤① Int. Cl.: **G02B6/26** (2006.01)
G02B6/287 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	PIERO ORLANDI et al. Tunable silicon photonics directional coupler driven by a transverse temperature gradient. Optics Letters, 20130315 Optical Society of America, US. , 15/03/2013, Vol. 38, Páginas 863 - 865, ISSN 0146-9592, <DOI: http://dx.doi.org/10.1364/OL.38.000863 >	1-11
A	HE ZHU et al. A compact tunable directional coupler with continuously tuned differential phase. IEEE Microwave and Wireless Components Letters Jan. 2018 IEEE USA. , 31/12/2017, Vol. 28, Páginas 19 - 21, ISSN 1531-1309, <DOI: 10.1109/LMWC.2017.2779819>	1-11
A	MAK JASON C C et al. Programmable multi-ring butterworth filters with automated resonance and coupling tuning. 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 20160320 OSA. , 20/03/2016, Páginas 1 - 3	1-11

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
05.12.2018

Examinador
J. Botella Maldonado

Página
1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G02B

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, NPL, XPESP, XPAIP, XPI3E, INSPEC