

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 379 058**

(21) Número de solicitud: 201230280

(51) Int. Cl.:

G02B 6/34

(2006.01)

(12)

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN PREVIO

B2

(22) Fecha de presentación: **23.02.2012**

(43) Fecha de publicación de la solicitud: **20.04.2012**

Fecha de la concesión: **19.09.2012**

(45) Fecha de anuncio de la concesión: **01.10.2012**

(45) Fecha de publicación del folleto de la patente:
01.10.2012

(73) Titular/es:

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

**Edf. Institutos Universitarios C/ Severo Ochoa,
s/n Parque Tecnológico de Andalucía
29071 Málaga, ES**

(72) Inventor/es:

HALIR, Robert;

MAESE NOVO, Alejandro;

ORTEGA MOÑUX, Alejandro y

MOLINA FERNANDEZ, Iñigo

(74) Agente/Representante:

Pons Ariño, Ángel

(54) Título: **Dispositivo acoplador de guías de onda, y método de diseño de dicho dispositivo**

(57) Resumen:

Dispositivo acoplador de guías de onda, y método de diseño de dicho dispositivo.

Permite aumentar el ancho de banda del dispositivo, sin que ello suponga un aumento de sus dimensiones, y sin que su repuesta en fase se degrade. El dispositivo acoplador (1) destaca por presentar en su zona de acoplamiento (30) al menos red (31) con un periodo (Λ) tal que garantice que no se producen fenómenos de difracción, estando dicha red (31) configurada para modificar la variación de las constantes de propagación (β_1, β_2) de los modos de primer y segundo orden (Φ_1, Φ_2) de la zona de acoplamiento (30) respecto a la longitud de onda, de manera que se reduce la variación de la longitud de batido (L_π) con la longitud de onda, aumentando así el ancho de banda del dispositivo acoplador (1).

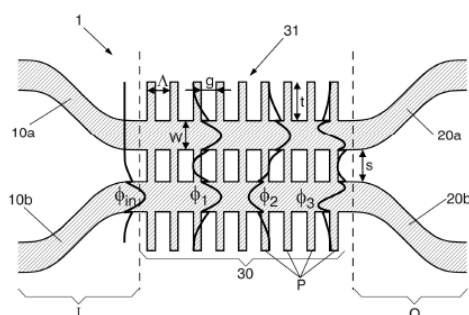


FIG. 5

ES 2 379 058 B2

DESCRIPCIÓN

Dispositivo acoplador de guías de onda, y método de diseño de dicho dispositivo.

5 OBJETO DE LA INVENCIÓN

La presente invención pertenece al campo de las telecomunicaciones y la óptica integrada, y más concretamente a dispositivos acopladores de luz entre guías de onda.

10 El objeto principal de la presente invención es un dispositivo acoplador de guías de onda, que destaca por presentar un ancho de banda considerable, sin que ello suponga un sobredimensionamiento del dispositivo, y sin que ello afecte negativamente a su respuesta en fase. Asimismo, es otro objeto de la invención el método de diseño de dicho dispositivo acoplador.

15 ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

En la actualidad son conocidos los dispositivos de acoplo o dispositivos acopladores de guías de onda, los cuales constituyen los elementos fundamentales en circuitos fotónicos integrados (PIC). Dichos dispositivos cumplen entre otras las funciones de dividir o combinar potencia entre dichas guías e imponer desfases específicos entre las ondas acopladas a cada guía de onda. Dichos acopladores de guías de onda se usan, entre otras aplicaciones, en demultiplexadores de longitud onda, conmutadores, receptores coherentes y biosensores.

Más en particular, en óptica integrada se usan generalmente dos tipos de acopladores: acopladores direccionales (AD) y acopladores de interferencia multi-modal (MMI). Los primeros tienen las ventajas de un diseño sencillo y de ratios de división arbitrarios, mientras que los segundos ofrecen generalmente mejores tolerancias de fabricación y un mayor ancho de banda.

Respecto a los acopladores direccionales (AD), su funcionamiento se basa esencialmente en colocar dos guías de ondas lo suficientemente juntas como para que las ondas luminosas que viajan por ellas interactúen, y así se transfiera potencia de una guía de onda a la otra, ver figura 1. En general este proceso es dependiente de la polarización de la onda luminosa; en adelante nos centraremos, sin pérdida de generalidad, en una polarización específica, como por ejemplo polarización horizontal (cuasi-TE), o vertical (cuasi-TM).

El proceso de acoplamiento entre guías de onda puede describirse en términos de los modos de primer y segundo orden (Φ_1 , Φ_2) de dos guías acopladas, y sus respectivas constantes de propagación (β_1 , β_2). Se entiende por "modos" aquellas distribuciones de campo que al propagarse por una guía de onda no modifican su forma. El campo de entrada (Φ_{in}) excita los modos (Φ_1 , Φ_2) en la región central de acoplo o zona de acoplamiento (ZA_{AD}), y debido a la diferencia entre sus constantes de propagación (β_1 y β_2) la potencia luminosa se transfiere de una guía a la otra. Dicha transferencia de potencia luminosa es máxima a la longitud de batido (L_{π}) de los supermodos:

$$L_{\pi} = \pi / (\beta_1 - \beta_2)$$

La longitud de batido (L_{π}) indica la distancia que debe recorrer un haz de luz para que sea totalmente transferido de una guía de onda a otra guía de onda. Sin embargo, esta longitud de batido (L_{π}) varía con la longitud de onda de dicho haz luminoso, de manera que el ancho de banda en el acoplador está limitado.

Actualmente, se han propuesto varias técnicas para mejorar el ancho de banda de los dispositivos acopladores direccionales (AD). Una de ellas consiste en conectar varios acopladores en un interferómetro "Mach-Zehnder", de manera que sus respuestas se compensen (B. Little et al, "Design rules for maximally flat wavelength-insensitive optical power dividers using Mach-Zehnder structures", 1997). Sin embargo esta técnica presenta el inconveniente de que aumenta considerablemente el tamaño del dispositivo, con los problemas y costes asociados que ello conlleva.

Por otra parte, en dispositivos acopladores basados en la conversión adiabática de modos, el ancho de banda se mejora usando formas específicas de variación gradual de la geometría de las guías de ondas en la región de acoplo. Sin embargo, esta técnica lleva ligada igualmente un aumento considerablemente del tamaño del dispositivo (Y. Shani et al "Integrated optic adiabatic devices on silicon," 1991).

Por último, se sabe que curvando el acoplador completo se puede incrementar su ancho de banda, pero esta técnica presenta el inconveniente de que degrada la respuesta en fase del dispositivo (C. Doerr et al, "Bending of a planar lightwave circuit 2x2 coupler to desensitize it to wavelength, polarization, and fabrication changes," 2005).

Respecto a los acopladores de interferencia multimodal (MMI), éstos constan de varias guías de ondas de entrada y salida

y una zona de acoplamiento (Z_{MMI}), que guía varios modos ($\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots$), tal y como se representa en la figura 2. Dichos acopladores de interferencia multimodal (MMI) presentan generalmente un comportamiento dependiente de la polarización; en lo que sigue nos centraremos sin pérdida de generalidad en un estado de polarización específico, por ejemplo una polarización horizontal (cuasi-TE) o vertical (cuasi-TM).

Un rayo de luz es lanzado en una de las guías de onda de entrada y excita varios modos ($\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots$) en la zona de acoplamiento (Z_{MMI}), los cuales se propagan con diferentes constantes de propagación ($\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots$). A unas determinadas distancias desde el plano de entrada, los modos ($\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots$) interfieren formando una o varias imágenes de la excitación de entrada. Las guías de onda de salida se colocan en la posición de estas imágenes, de manera que la luz se acopla a ellas. La distancia a la que se forman las imágenes depende en esencia de la longitud de batido (L_π) de los modos de primer y segundo orden (Φ_1, Φ_2) de la zona de acoplamiento: $L_\pi = \pi / (\beta_1 - \beta_2)$.

Además, para que se formen imágenes de alta calidad las constantes de propagación (β_m) de los modos de la zona de acoplamiento tienen que seguir la ley parabólica:

$$\beta_m = \beta_1 - (m^2 - 1) \pi / (3L_\pi)$$

Los acopladores de interferencia multimodal (MMI) tienen un ancho de banda mayor que los acopladores direccionales (AD), pero dicho ancho de banda sigue estando limitado por la variación de la longitud de batido (L_π) con la longitud de onda. De hecho, el ancho de banda de los acopladores de interferencia multimodal (MMI) disminuye conforme se aumenta el número de entradas y/o salidas (P. Besse et al, "Optical bandwidth and fabrication tolerances of multimode interference couplers", 1994).

Por tanto, el problema técnico que aquí se plantea es conseguir un dispositivo acoplador de guías de ondas que ofrezca un ancho de banda lo más grande posible, sin que ello tenga como consecuencia una ampliación de sus dimensiones, y sin que su respuesta en fase se vea afectada.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Mediante la presente invención se resuelve el problema técnico anteriormente planteado proporcionando un dispositivo acoplador de guías de onda que presenta un aumento considerable de su ancho de banda con respecto a los dispositivos actuales, sin que ello suponga un aumento del tamaño del dispositivo, y sin que su respuesta en fase se vea degradada.

El dispositivo acoplador objeto de invención es del tipo que comprende al menos una guía de onda de entrada en la cual está destinado a inyectarse un haz luminoso, al menos una guía de onda de salida, y una zona de acoplamiento localizada entre dichas guías de onda de entrada y salida, estando dicha zona de acoplamiento configurada para acoplar el haz luminoso de la guía de onda de entrada a la guía de onda de salida.

Más concretamente, el dispositivo acoplador destaca fundamentalmente por presentar en la zona de acoplamiento al menos una red constituida por un sustrato, un núcleo y un revestimiento, presentando dicha red un periodo inferior a la mitad de la longitud de onda menor del rango de operación del dispositivo acoplador (se entiende que cada dispositivo acoplador trabaja para un determinado rango de longitudes de onda), dividida entre el menor de los índices de refracción del sustrato, el núcleo y el revestimiento de la red, y que garantice que no se producen fenómenos de difracción (la radiación y reflexión son despreciables a efecto prácticos). De aquí en adelante una red de estas características se denominará simplemente red. Los modos que soportan estas redes tienen distribuciones de campo periódicas y se denominan modos Floquet o modos Bloch; de aquí en adelante se denominarán simplemente modos.

Dicha red está configurada para modificar la variación de las constantes de propagación (β_1, β_2) de los modos de primer y segundo orden (Φ_1, Φ_2) de la zona de acoplamiento respecto a la longitud de onda, de manera que se reduce la variación de la longitud de batido con la longitud de onda, consiguiendo aumentar así el ancho de banda del dispositivo acoplador. Preferentemente, dicha red comprende una guía de onda segmentada cuyos elementos se disponen de forma periódica, perpendicularmente a la dirección de propagación del haz luminoso, y con un periodo inferior al periodo de Bragg de primer orden.

En la presente invención se propone la utilización de las propiedades dispersivas de dichas redes, esto es, la variación de sus propiedades con la longitud de onda de operación del dispositivo.

Se empleará aquí el término "guía de ondas uniformes" para referirse a las guías de onda convencionales, con objeto de poder distinguirlas de aquellas guías que utilizan redes. Además, se ha previsto que las guías de onda aquí descritas puedan diseñarse para un rango determinado de longitudes de onda; y que las guías de onda de entrada y salida puedan ser guías de ondas uniformes o redes.

De acuerdo con una primera realización preferente, el dispositivo acoplador de la invención comprende adicionalmente en

la zona de acoplamiento al menos dos guías de ondas uniformes, donde la red está configurada para modificar la variación de las constantes de propagación (β_1 , β_2) de los modos de primer y segundo orden (Φ_1 , Φ_2) en la zona de acoplamiento en función de la longitud de onda, de manera que se reduce la variación de la longitud de batido con la longitud de onda, consiguiendo aumentar así el ancho de banda del dispositivo, trabajando en este caso como un acoplador direccional, con un ratio de división predefinido. Además, preferentemente, la red está dispuesta esencialmente perpendicular a las guías de onda uniformes.

Asimismo, se ha previsto que en esta primera realización, el ciclo de trabajo y la extensión lateral de la red estén configurados de modo que se reduce la excitación del modo de tercer orden (Φ_3) que produce una transferencia de potencia indeseada entre las guías de ondas uniformes.

De acuerdo con una segunda realización preferente, la red de la zona de acoplamiento está adaptada para soportar al menos dos modos guiados de la misma polarización (cuasi-TE o cuasi-TM), donde la red está configurada para modificar la variación con la longitud de onda de las constantes de propagación de los modos en la zona de acoplamiento, de manera que se reduce la variación de la longitud de batido con la longitud de onda, aumentando así el ancho de banda del dispositivo, el cual trabaja en este caso como un acoplador de interferencia multimodal. Además, el dispositivo acoplador así configurado presenta unos errores de fase modal menores que un acoplador de interferencia multimodal convencional, esto es, las constantes de propagación de los modos superiores siguen mejor la ley parabólica requerida para formar imágenes de alta calidad.

Finalmente, de acuerdo con una tercera realización preferente, la red está configurada para reducir la variación de la longitud de batido respecto a la longitud de onda tanto para polarizaciones horizontales cuasi-TE como para polarizaciones verticales cuasi-TM, y donde la longitud de la zona de acoplamiento es un múltiplo par de la longitud de batido para el haz luminoso con polarización cuasi-TE y un múltiplo impar de la longitud de batido para el haz luminoso con polarización cuasi-TM. No obstante se ha previsto que pueda ser al contrario, múltiplo par para polarización cuasi-TM, y múltiplo impar para polarización cuasi-TE. En este caso, el dispositivo acoplador de la presente invención trabajaría como un separador de polarización de banda ancha, que puede estar basado tanto en un acoplador direccional o en un acoplador de interferencia multimodal.

De acuerdo con otro objeto de la invención, se describe a continuación el método de diseño del dispositivo acoplador descrito anteriormente. Dicho método de diseño comprende al menos las siguientes etapas:

- a) se parte de una guía de onda donde se definen sus parámetros y materiales de diseño para el sustrato, el núcleo y el revestimiento,
- b) se ajusta el periodo de la red a un valor ligeramente inferior al periodo de Bragg de primer orden, de manera que no se produzcan fenómenos de difracción,
- c) se determina, por simulación, la variación de las constantes de propagación (β_1 , β_2) de los modos de primer y segundo orden (Φ_1 , Φ_2) de la zona de acoplamiento,
- d) se comprueba si la variación de la longitud de batido con respecto a la longitud de onda se ha reducido,
- e1) si en la etapa d) se ha conseguido reducir la variación de la longitud de batido se ajusta de nuevo el periodo de la red reduciéndolo ligeramente,
- e2) si en la etapa e) no se ha conseguido reducir la longitud de batido se escoge el valor del periodo para el que se había conseguido reducir dicha longitud de batido, y
- f) se diseña el dispositivo acoplador completo para el valor del periodo de la etapa e2), para el cual se obtiene un aumento máximo de su ancho de banda.

Preferentemente los parámetros ajustados en la fase a) es al menos uno seleccionado entre: periodo, ciclo de trabajo, hueco, grosor, profundidad de grabado, anchura, distancia, y extensión lateral.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Muestra una vista esquemática de un acoplador direccional convencional.

Figura 2.- Muestra una vista esquemática de un acoplador de interferencia multimodal convencional.

Figura 3.- Muestra una vista de perfil esquemática de una red.

Figura 4.- Muestra una gráfica que representa la variación de la longitud de batido con respecto a la longitud de onda

empleando un acoplador direccional convencional.

Figura 5.- Muestra una vista del dispositivo acoplador de la invención configurado para trabajar como un acoplador direccional, según una primera realización preferente.

Figura 6.- Muestra otra gráfica que representa la variación de la longitud de batido con respecto a la longitud de onda empleando ahora el dispositivo acoplador direccional de acuerdo con la primera realización de la invención.

Figura 7.- Muestra una gráfica donde se simulan las pérdidas de inserción del dispositivo acoplador direccional de la invención, comparadas con las pérdidas de inserción de un acoplador direccional convencional.

Figuras 8a, 8b.- Muestran la respuesta de fase simulada del dispositivo acoplador direccional de la invención.

Figura 9.- Muestra una gráfica que representa la variación de la longitud de batido con respecto a la longitud de onda empleando un acoplador de interferencia multimodal convencional.

Figura 10.- Muestra una vista del dispositivo acoplador de la invención configurado para trabajar como un acoplador de interferencia multimodal, según una segunda realización preferente.

Figura 11.- Muestra una gráfica que representa la variación de la longitud de batido con respecto a la longitud de onda empleando el dispositivo acoplador de interferencia multimodal de acuerdo con la segunda realización de la invención.

Figuras 12a, 12b.- Muestran las prestaciones del dispositivo acoplador de interferencia multimodal según la segunda realización preferente de la invención, comparadas con las de un acoplador de interferencia multimodal convencional.

Figura 13.- Muestra una vista esquemática de un dispositivo acoplador de interferencia multimodal según la presente invención, presentando una configuración 2x4.

Figuras 14a, 14b, 14c, 14d.- Muestran las prestaciones del dispositivo acoplador de interferencia multimodal 2x4 de la figura 13.

Figura 15.- Muestra una vista del dispositivo acoplador de la invención configurado para trabajar como un separador de polarización de banda ancha, según una tercera realización preferente.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

Se describen a continuación varios ejemplos de realizaciones preferidas, haciendo mención a las figuras arriba citadas, sin que ello suponga limitación alguna en el ámbito de protección de la presente invención.

Para los siguientes ejemplos, el dispositivo acoplador (1) y la red (31) que contiene, se diseñan con un sustrato (2) formado por dióxido de silicio, un núcleo (3) de silicio, y un revestimiento (4) de polímero SU-8. Los índices de refracción a la longitud de onda de espacio libre de $1,55\mu\text{m}$ son $n_{\text{SiO}_2}=1,444$, $n_{\text{Si}}=3,476$ y $n_{\text{SU8}}=1,58$ respectivamente. Asimismo, se asume polarización horizontal cuasi-TE (en dirección del eje x).

En la figura 3 se muestra una vista en perfil de una red (31), donde "g" es el hueco entre los elementos de la red (31), y el ciclo de trabajo (DC) se define como $\text{DC}=(\Lambda-g)/\Lambda$. El grosor del núcleo (3) de la guía de onda, representada por "H", tiene en los siguientes ejemplos un valor de $H=0,26\mu\text{m}$. Asimismo, la profundidad de grabado en el núcleo (3) representada con la letra "D", es en este caso prácticamente igual al grosor (H) del mismo, pudiendo no obstante tomar cualquier valor.

De acuerdo con una primera realización preferente, se describe a continuación el dispositivo acoplador (1) de la invención configurado como un acoplador direccional.

En la gráfica de la figura 4 se puede apreciar la variación de la longitud de batido (L_π) de un acoplador direccional "convencional" con la longitud de onda. Se observa que en el rango de longitudes de onda entre $1,5\mu\text{m}$ y $1,6\mu\text{m}$, la longitud de batido (L_π) varía de forma prácticamente lineal con la longitud de onda, cambiando su valor en aproximadamente un 40%.

Para obtener, por ejemplo, un acoplador direccional simétrico con un ratio de división de potencia de salida de 50/50, la longitud de la zona de acoplamiento se ha fijado en $L_\pi/2$ a la longitud de onda central, esto es, a $1,55\mu\text{m}$. Conforme varía la longitud de onda la longitud de batido (L_π) cambia y el dispositivo deja de estar sintonizado. Por tanto, para incrementar el ancho de banda del dispositivo es necesario reducir la variación de la longitud de batido

(L_{π}) con la longitud de onda. En dicho acoplador direccional convencional, ver figura 1, se han empleado guías de ondas uniformes con una anchura de $W=0,45\mu\text{m}$ y separadas una distancia $s=0,3\mu\text{m}$ en la zona de acoplamiento (ZA_{AD}).

En la figura 5 se muestra el dispositivo acoplador (1) configurado según la presente invención para trabajar como acoplador direccional y mediante el cual se consigue reducir la variación de la longitud de batido (L_{π}) con la longitud de onda, incrementando por tanto el ancho de banda del dispositivo acoplador (1). Más concretamente en dicha figura 5 se observa una configuración 2x2 del dispositivo acoplador (1) con dos guías de onda de entrada (10a, 10b) y dos guías de onda de salida (20a, 20b) entre las cuales se encuentra una zona de acoplamiento (30). Dicha zona de acoplamiento (30) presenta una red (31). En este caso particular el periodo (Λ) de la red (31) es $\Lambda=271\text{nm}$, lo que impide que se produzca difracción en el rango de longitudes de onda de $1,5\mu\text{m}$ a $1,6\mu\text{m}$.

Además, en dicha figura 5 puede apreciarse que en la zona de acoplamiento (30) del dispositivo acoplador (1) existe un modo de tercer orden (Φ_3), que puede excitarse y producir transferencia de potencia indeseada. Este modo de tercer orden (Φ_3) también está presente en los acopladores convencionales donde su excitación es, sin embargo, despreciable. En el dispositivo acoplador (1) de la invención dicha excitación producida por el modo de tercer orden (Φ_3) se reduce usando dos mecanismos.

En primer lugar, la extensión lateral (t) de la red (31) se ha aumentado a ambos lados de las guías de onda (10a, 10b, 20a, 20b). En este caso particular una extensión lateral $t>0,4\mu\text{m}$ ha resultado ser suficiente para reducir dicha excitación del modo de tercer orden (Φ_3). En segundo lugar, el ciclo de trabajo (DC) de la red (31), definido anteriormente como $DC=(\Lambda-g)/\Lambda$, se mantiene por debajo de un determinado umbral, que es aproximadamente un 25% en este caso particular. De esta manera se consigue que la potencia acoplada al modo de tercer orden (Φ_3) disminuya conforme el ciclo de trabajo (DC) de la red (31) se reduce, y, para esta configuración particular, dicha potencia acoplada es despreciable para ciclos de trabajo (DC) por debajo del 25%. Cabe señalar que este es un comportamiento general que se observa para diferentes periodos (Λ) de la red (31).

La variación de la longitud de batido (L_{π}) con la longitud de onda se controla usando las propiedades dispersivas de la red (31), esto es, la variación con la longitud de onda de las constantes de propagación (β_1 , β_2) de los modos de primer y segundo orden (Φ_1 , Φ_2). Estas propiedades dispersivas pueden ser configuradas con el periodo (Λ) y el ciclo de trabajo (DC) de la red (31), que a su vez, controlan la longitud de onda de Bragg de la red (31). Usando este concepto, y para una distancia (s) de separación entre guías de ondas uniformes en la zona de acoplamiento (30) de $s=0,5\mu\text{m}$, un periodo de $\Lambda=271\text{nm}$ y un ciclo de trabajo de $DC=22,5\%$, la variación de la longitud de batido (L_{π}) con la longitud de onda se reduce de manera significativa, tal y como se representa en la gráfica de la figura 6. Así, la longitud de batido (L_{π}) del dispositivo acoplador (1) objeto de invención varía sólo en un 8% en la banda de longitudes de onda de $1,5\mu\text{m}$ a $1,6\mu\text{m}$, lo que supone una reducción por un factor cinco en comparación con un acoplador direccional convencional.

Nótese que la variación de la longitud de batido (L_{π}) con la longitud de onda sólo se reduce en la zona de acoplamiento (30) del dispositivo acoplador (1) direccional, donde existe la red (31) de periodo (Λ) inferior a la longitud de onda, pero no se reduce en las regiones de entrada (I) y de salida (O), las cuales están desacopladas. Además, cabe indicar que dependiendo del número de periodos (P) de la red (31) se obtienen diferentes ratios de acoplamiento.

Para mostrar la mejora del ancho de banda del dispositivo acoplador (1) direccional de la invención comparado con un acoplador direccional convencional nos centraremos, a modo de ejemplo, en un acoplador simétrico 2x2 50/50 (3dB) que se obtiene con una red (31) con $P=71$ periodos. En la figura 7 se muestran las pérdidas de inserción del dispositivo acoplador (1) direccional de la invención, comparándolas con las de un acoplador direccional convencional. Tanto simulaciones 2D con una herramienta basada en un método de expansión modal, como simulaciones completas 3D con el método FDTD, muestran que la diferencia de potencia entre las dos regiones de salida (O) varía en tan sólo $\pm 0,6\text{dB}$ en el rango considerado de longitudes de onda de $1,5\mu\text{m}$ a $1,6\mu\text{m}$, es decir una banda ancha de 100nm , tal y como se puede apreciar en dicha figura 7. Por su parte, el acoplador direccional convencional únicamente cubre con estas mismas prestaciones un ancho de banda de 20nm , lo que confirma el incremento del ancho de banda conseguido con el dispositivo acoplador (1) direccional de la invención en un factor de cinco.

En las figuras 8a y 8b se muestra la respuesta de fase del dispositivo acoplador (1) direccional 2x2 de la figura 5. Más concretamente en la figura 8a se representa el desfase entre los haces luminosos en las guías de onda de salida (20a, 20b) cuando se inyecta un haz luminoso en la guía de onda de entrada (10a). Así, se observa que el desfase está muy próximo al valor ideal de 90° en toda la banda de longitudes de onda considerada, esto es, de $1,5\mu\text{m}$ a $1,6\mu\text{m}$. Por otra parte, en la figura 8b se muestra el desfase diferencial con el que las ondas luminosas procedentes de las guías de onda de entrada (10a, 10b) se combinan en las guías de onda de salida (20a, 20b). Se observa que

el desfase diferencial está muy cercano al valor ideal de 180° en toda la banda de longitudes de onda considerada. Por último, cabe señalar que la reflexión del dispositivo acoplador (1) direccional de la presente invención se mantiene por debajo de -15dB en toda la banda de longitudes de onda considerada, de $1,5\mu\text{m}$ a $1,6\mu\text{m}$.

- 5 A continuación, de acuerdo con una segunda realización preferente, se describe el dispositivo acoplador (1) de la invención configurado para trabajar como un acoplador de interferencia multimodal, en adelante acoplador “MMI”.

La figura 9 muestra una gráfica donde se representa la variación de la longitud de batido (L_π) con respecto a la longitud de onda de un acoplador MMI convencional. Para este acoplador MMI convencional se han considerado
10 unas guías de ondas uniformes de entrada y salida con una distancia (s) de separación de $2\mu\text{m}$ y una anchura (W_{MMI}) de $6\mu\text{m}$, ver figura 2. Nótese que en comparación con el dispositivo acoplador (1) direccional arriba descrito, ahora se está considerando un ancho de banda mayor de $1,26\mu\text{m}$ a $1,7\mu\text{m}$. En esta banda la longitud de batido (L_π) del dispositivo varía aproximadamente en un 40%.

- 15 Para obtener, por ejemplo, un acoplador MMI simétrico 2x2 con potencia de salida 50/50, la longitud de onda de la zona de acoplamiento (30) se ha fijado para optimizar el dispositivo a la longitud de onda central, esto es, a $1,48\mu\text{m}$. De forma análoga al caso anterior, conforme varía la longitud de onda, la longitud de batido (L_π) cambia y el dispositivo se de-sintoniza, empeorando sus prestaciones.

20 En la figura 10 se muestra un dispositivo acoplador (1) 2x2, con dos guías de onda de entrada (10a, 10b) y dos guías de onda de salida (20a, 20b), configurado según la presente invención para trabajar como acoplador MMI, presentando en la zona de acoplamiento (30) una red (31) que permite reducir la variación de la longitud de batido (L_π) con respecto a la longitud de onda a la que opera el dispositivo, lo que resulta en un aumento de su ancho de banda. En dicha figura 10 se muestra el dispositivo acoplador (1) MMI en una configuración 2x2, no obstante se ha
25 previsto que pueda configurarse según cualquier otra configuración, tal como 1x2, 1x4, 2x2, 2x3, 3x3 y 2x4, presentando siempre la zona de acoplamiento (30) al menos una red (31).

Configurando adecuadamente el periodo (Λ) y el ciclo de trabajo (DC) de la red (31), se puede controlar la variación con la longitud de onda de las constantes de propagación (β_1, β_2) de los modos de primer y segundo orden (Φ_1, Φ_2)
30 de la zona de acoplamiento (30). De hecho, eligiendo un ancho de la zona de acoplamiento (30) de $6\mu\text{m}$, y un ciclo de trabajo (DC) del 50% y un periodo de $\Lambda=190\text{nm}$ se consigue reducir la variación de la longitud de batido (L_π) a aproximadamente un 10%, tal y como se representa en la figura 11. Nótese que aunque en la presente realización sólo se ha ajustado la longitud de batido (L_π) de los dos modos de primer y segundo orden (Φ_1, Φ_2) de la zona de acoplamiento (30), el dispositivo acoplador (1) MMI presenta también unas prestaciones excelentes para otros
35 modos relevantes de la zona de acoplamiento (30).

Para mostrar el incremento de ancho de banda que ofrece el dispositivo acoplador (1) MMI de la presente invención nos centraremos a continuación, a modo de ejemplo, en acopladores MMI en configuración 2x2 y 2x4, ya que éstos son de particular interés para la recepción coherente.

40 Se parte de un acoplador MMI convencional 2x2, con $P=122$ periodos en la zona de acoplamiento. En la figura 12a se muestra una gráfica en la que se simulan las pérdidas de inserción (PI) y el desbalanceo (Desb) de un dispositivo acoplador (1) MMI 2x2 según la invención, comparándolas con las de un acoplador MMI convencional. Todas las simulaciones incluyen el efecto de la dispersión del material. En dicha figura 12a se puede observar que el
45 dispositivo acoplador (1) MMI de la invención presenta un ancho de banda de 500nm, de $1,25\mu\text{m}$ a $1,75\mu\text{m}$, con un desbalanceo por debajo de 0,6dB, lo que es casi cinco veces más ancho de banda que un MMI convencional. Por otro lado, en la figura 12b se puede observar que el error de fase (EF), esto es, la desviación de los 90° de desfase que hay idealmente entre las guías de onda de salida (20a, 20b), está por debajo de $\pm 5^\circ$ en el rango de las longitudes de onda de $1,25\mu\text{m}$ a $1,75\mu\text{m}$. En comparación, un acoplador MMI convencional presenta un error de fase (EF_{conv})
50 tan reducido como el de la invención tan sólo en un ancho de banda de 150nm.

En la figura 13 se muestra un dispositivo acoplador (1) MMI de configuración 2x4, con dos guías de onda de entrada (10a, 10b) y cuatro guías de onda de salida (20a, 20b, 20c, 20d), basado en el concepto de la presente invención, y donde la red (31) está dispuesta esencialmente perpendicular a dichas guías de onda de entrada y salida (10a, 10b, 20a, 20b, 20c, 20d). Este dispositivo es de particular interés porque es un componente clave para los sistemas de
55 recepción coherentes.

En las figuras 14a, 14b, 14c, 14d se comparan las prestaciones del dispositivo acoplador (1) MMI 2X4 con un acoplador MMI convencional. Más concretamente en la figura 14a se muestra el desbalanceo existente entre las
60 salidas del dispositivo acoplador (1) MMI de la invención para cada una de las dos entradas, que está por debajo de 1,6dB en un ancho de banda de 200nm, de $1,45\mu\text{m}$ a $1,65\mu\text{m}$. Por otro lado, en la gráfica de la figura 14b se muestra un acoplador de MMI convencional, el cual presenta un desbalanceo por debajo de 1,6dB sólo en una banda de

100nm. Además, en las figuras 14c y 14d se muestran gráficas de representación del desfase diferencial con que las ondas luminosas de las guías de onda de entrada (10a, 10b) se combinan en las guías de onda de salida (20a, 20b, 20c, 20d).

5 Más en particular, en la figura 14c se observa que los desfases diferenciales con los que los haces luminosos procedentes de las guías de onda de entrada (10a, 10b) se combinan en las guías de onda de salida (20a, 20b, 20c, 20d), es cercano al valor ideal de 90° entre los pares de guías de onda de salida (20a-20b, 20b-20d, 20d-20c), desviándose de dicho valor ideal de 90° en menos de 20° en todo el ancho de banda de 200nm considerado. Por su parte, en la gráfica de la figura 14d se muestra el desfase diferencial de un acoplador MMI convencional, el cual se desvía hasta 90° de su valor ideal para el mismo ancho de banda considerado, de $1,45\mu\text{m}$ a $1,65\mu\text{m}$.

10 En los ejemplos de realización descritos hasta ahora se ha asumido que el dispositivo acoplador (1) opera con una sola polarización, concretamente polarización horizontal (cuasi-TE), a lo largo del eje x. No obstante, se ha previsto que puedan configurarse igualmente dispositivos acopladores (1) que operen con polarización vertical (cuasi-TM).

15 De acuerdo con una tercera realización preferente, mostrada en la figura 15, el dispositivo acoplador (1) está configurado para trabajar como un separador de polarización de banda ancha. Para esta aplicación la red (31) existente en la zona de acoplamiento (30) se configura de tal manera que se reduce la variación de la longitud de batido (L_π) con la longitud de onda para ambas polarizaciones (cuasi-TE, cuasi-TM). Los valores de las longitudes de batido (L_π) para cada una de dichas polarizaciones son bastante diferentes debido a la fuerte birrefringencia de las redes (31). Por tanto, la longitud (L) de la zona de acoplamiento (30) se configura de modo que cuando se inyecta un haz luminoso de una polarización (cuasi-TE o cuasi-TM), en una guía de onda de entrada (10), dicho haz luminoso se acopla completamente a una de las guías de onda de salida (20a), mientras que si se inyecta un haz luminoso con polarización opuesta a través de la guía de onda de entrada (10) dicho haz luminoso se acopla completamente a la otra guía de onda de salida (20b), tal y como se muestra en la figura 15.

REIVINDICACIONES

1.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, que comprende:

- al menos una guía de onda de entrada (10a, 10b) en la cual está destinado a inyectarse un haz luminoso,

- al menos una guía de onda de salida (20a, 20b, 20c, 20d), y

- una zona de acoplamiento (30) localizada entre dichas guías de ondas de entrada y salida (10a, 10b, 20a, 20b, 20c, 20d), y que está configurada para acoplar el haz luminoso de la guía de onda de entrada (10a, 10b) a la guía de onda de salida (20a, 20b, 20c, 20d),

caracterizado porque la zona de acoplamiento (30) comprende al menos una red (31) constituida por un sustrato (2), un núcleo (3) y un revestimiento (4), presentando dicha red (31) un periodo (Λ) inferior a la mitad de la longitud de onda menor del rango de operación del dispositivo acoplador (1), dividida entre el menor de los índices de refracción del sustrato (2), el núcleo (3) y el revestimiento (3) de la red (31), y que garantiza que no se producen fenómenos de difracción, estando dicha red (31) configurada para modificar la variación de las constantes de propagación (β_1, β_2) de los modos de primer y segundo orden (Φ_1, Φ_2) de la zona de acoplamiento (30) respecto a la longitud de onda, de manera que se reduce la variación de la longitud de batido (L_π) con la longitud de onda, aumentando así el ancho de banda del dispositivo acoplador (1).

2.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque la red (31) comprende una guía de onda segmentada cuyos elementos se disponen de forma periódica, perpendicularmente a la dirección de propagación del haz luminoso, y con un periodo (Λ) inferior al periodo de Bragg de primer orden.

3.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque las guías de ondas de entrada y salida (10a, 10b, 20a, 20b, 20c, 20d) son guías de ondas uniformes.

4.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque las guías de ondas de entrada y salida (10a, 10b, 20a, 20b, 20c, 20d) comprenden redes (31).

5.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque comprende adicionalmente al menos dos guías de ondas uniformes en la zona de acoplamiento (30), estando la red (31) configurada para modificar la variación de las constantes de propagación (β_1, β_2) de los modos de primer y segundo orden (Φ_1, Φ_2) en la zona de acoplamiento (30) en función de la longitud de onda, de manera que se reduce la variación de la longitud de batido (L_π) con la longitud de onda, trabajando el dispositivo acoplador (1) como un acoplador direccional, con un ratio de división predefinido.

6.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con la reivindicación 5, caracterizado porque la red (31) está dispuesta esencialmente perpendicular a las guías de onda uniformes.

7.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con la reivindicación 5, caracterizado porque la red (31) presenta un ciclo de trabajo (DC) y una extensión lateral (t) configurados para reducir la excitación del modo de tercer orden (Φ_3) que produce una transferencia de potencia indeseada entre las guías de ondas uniformes.

8.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque la red (31) está adaptada para soportar al menos dos modos (Φ_1, Φ_2) guiados de la misma polarización (cuasi-TE o cuasi-TM), estando la red (31) configurada para modificar la variación con la longitud de onda de las constantes de propagación (β_1, β_2) de los modos (Φ_1, Φ_2) en la zona de acoplamiento (30) de manera que se reduce la variación de la longitud de batido (L_π) con la longitud de onda, trabajando el dispositivo acoplador (1) como un acoplador de interferencia multimodal.

9.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado porque la red (31) está dispuesta esencialmente perpendicular a las guías de onda de entrada (10a, 10b) y las guías de onda de salida (20a, 20b, 20c, 20d).

10.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 5 u 8, caracterizado porque comprende dos guías de onda de entrada (10a, 10b) y dos guías de onda de salida (20a, 20b), y donde el desfase entre los haces luminosos en las guías de onda de salida (20a, 20b) es aproximadamente 90° .

11.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado porque comprende dos guías de onda de entrada (20a, 20b) y cuatro guías de onda de salida (20a, 20b, 20c, 20d), y donde los desfases diferenciales con los que los haces luminosos procedentes de las guías de onda de entrada (10a, 10b) se combinan

en las guías de onda de salida (20a, 20b, 20c, 20d) es aproximadamente de 90°, entre los pares de guías de onda de salida (20a-20b, 20b-20d, 20d-20c).

12.- Dispositivo acoplador (1) de guías de onda, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque la red (31) está configurada para reducir la variación de la longitud de batido (L_{π}) respecto a la longitud de onda tanto para polarizaciones horizontales cuasi-TE como para polarizaciones verticales cuasi-TM, y donde la longitud (L) de la zona de acoplamiento (30) es un múltiplo par de la longitud de batido (L_{π}) para el haz luminoso con polarización cuasi-TE, y un múltiplo impar de la longitud de batido (L_{π}) para el haz luminoso con polarización cuasi-TM, o viceversa, trabajando el dispositivo acoplador (1) como un separador de polarización de banda ancha.

13.- Método de diseño del dispositivo acoplador (1) descrito en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque comprende al menos las siguientes etapas:

a) se parte de una guía de onda donde se definen sus parámetros y materiales de diseño para el sustrato (2), el núcleo (3) y el revestimiento (4),

b) se ajusta el periodo (Λ) de la red a un valor ligeramente inferior al periodo de Bragg de primer orden, de manera que no se produzcan fenómenos de difracción,

c) se determina, por simulación, la variación de las constantes de propagación β_1, β_2 de los modos de primer y segundo orden (Φ_1, Φ_2) de la zona de acoplamiento (30),

d) se comprueba si la variación de la longitud de batido (L_{π}) con respecto a la longitud de onda se ha reducido,

e1) si en la etapa d) se ha conseguido reducir la variación de la longitud de batido (L_{π}) se ajusta de nuevo el periodo (Λ) de la red (31) reduciéndolo ligeramente,

e2) si en la etapa e) no se ha conseguido reducir la longitud de batido (L_{π}) se escoge el valor del periodo (Λ) para el que se había conseguido reducir dicha longitud de batido (L_{π}), y

f) se diseña el dispositivo acoplador (1) completo para el valor del periodo (Λ) de la etapa e2), para el cual se obtiene un aumento máximo de su ancho de banda.

14.- Método de diseño de acuerdo con la reivindicación 13, caracterizado porque los parámetros ajustados en la fase a) es al menos uno seleccionado entre:

- periodo (Λ),

- ciclo de trabajo (DC),

- hueco (g),

- grosor (H),

- profundidad de grabado (D),

- anchura (W),

- distancia (s), y

- extensión lateral (t).

15.- Método de diseño de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 13 ó 14, caracterizado porque en la fase a) se parte de una red (1) que comprende un sustrato (2) de dióxido de silicio, un núcleo (3) de silicio, y un revestimiento (4) de polímero SU-8.

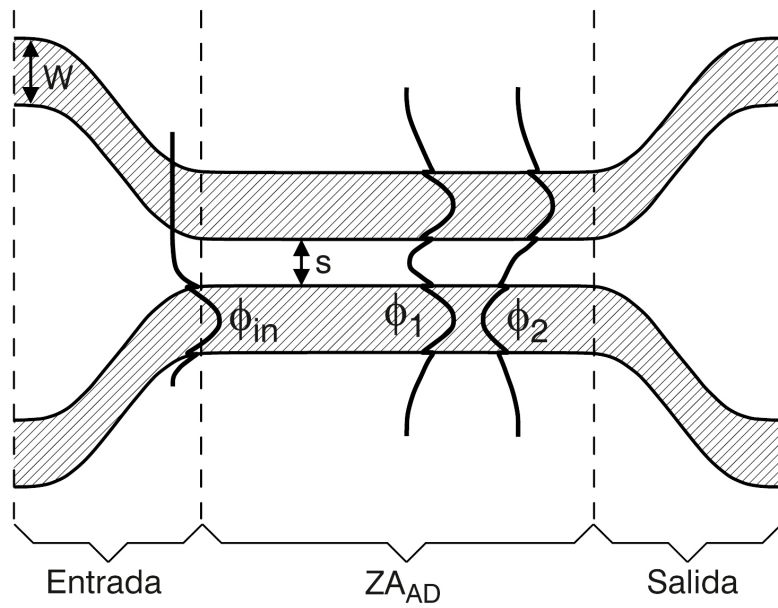


FIG. 1
ESTADO DE LA TÉCNICA

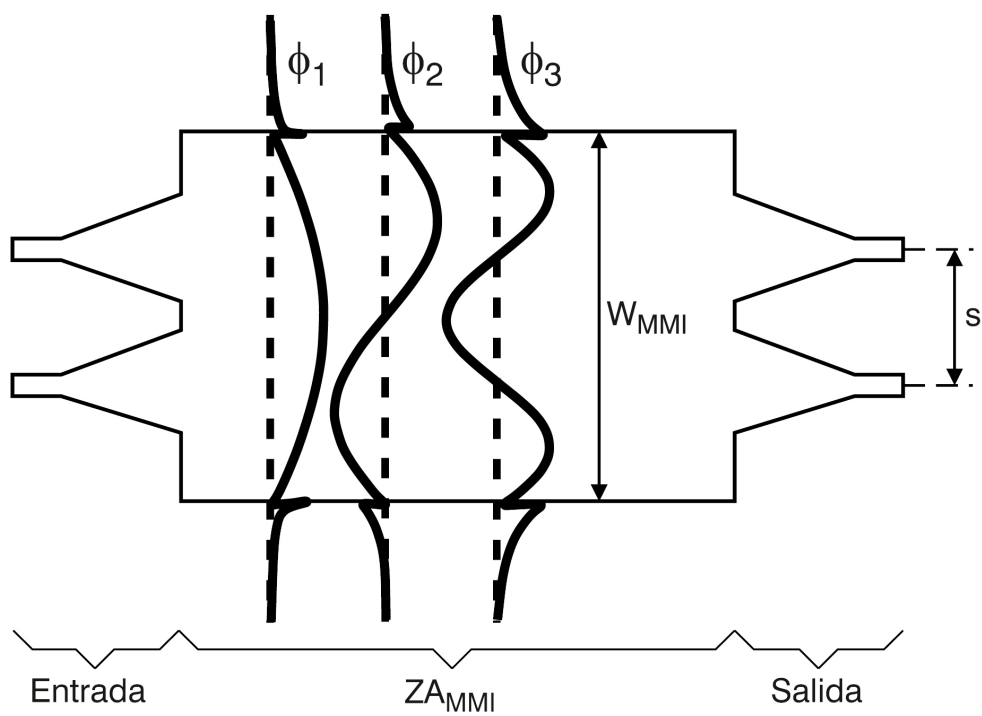


FIG. 2
ESTADO DE LA TÉCNICA

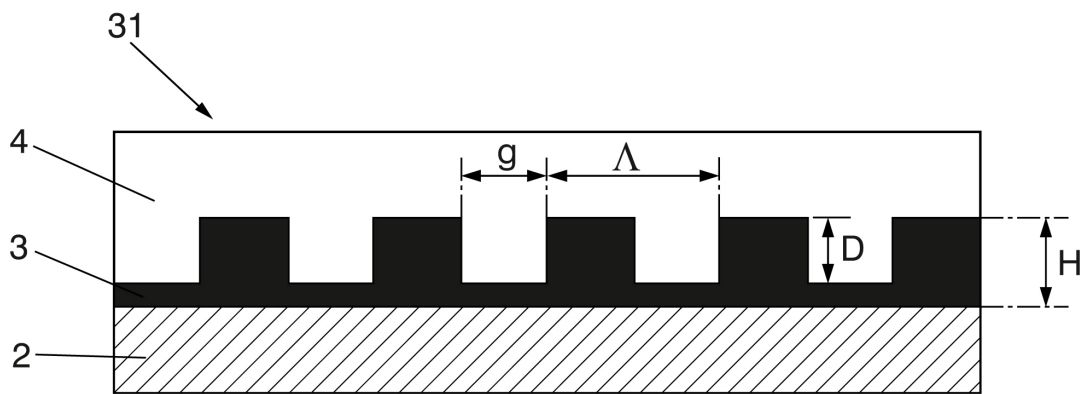


FIG. 3

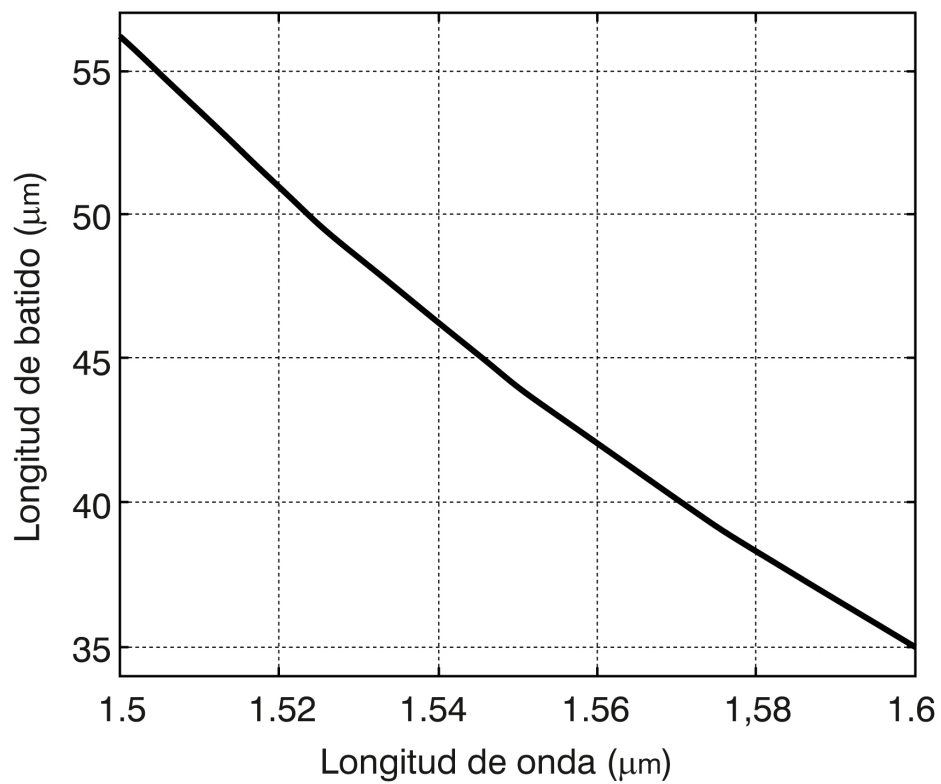


FIG. 4

ESTADO DE LA TÉCNICA

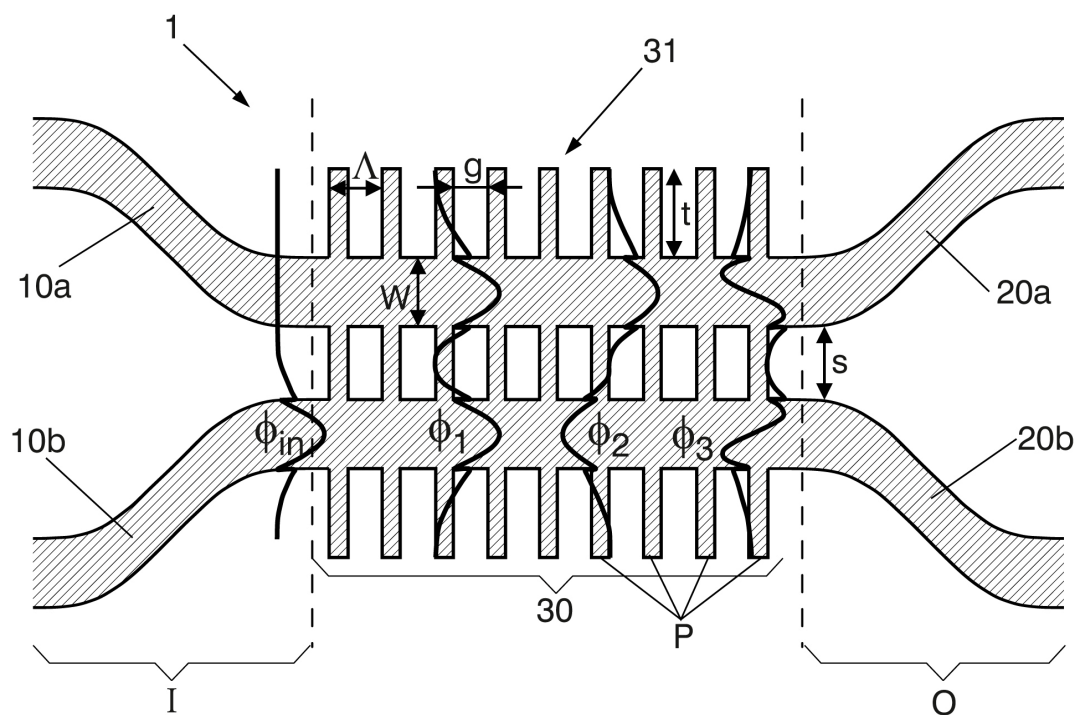


FIG. 5

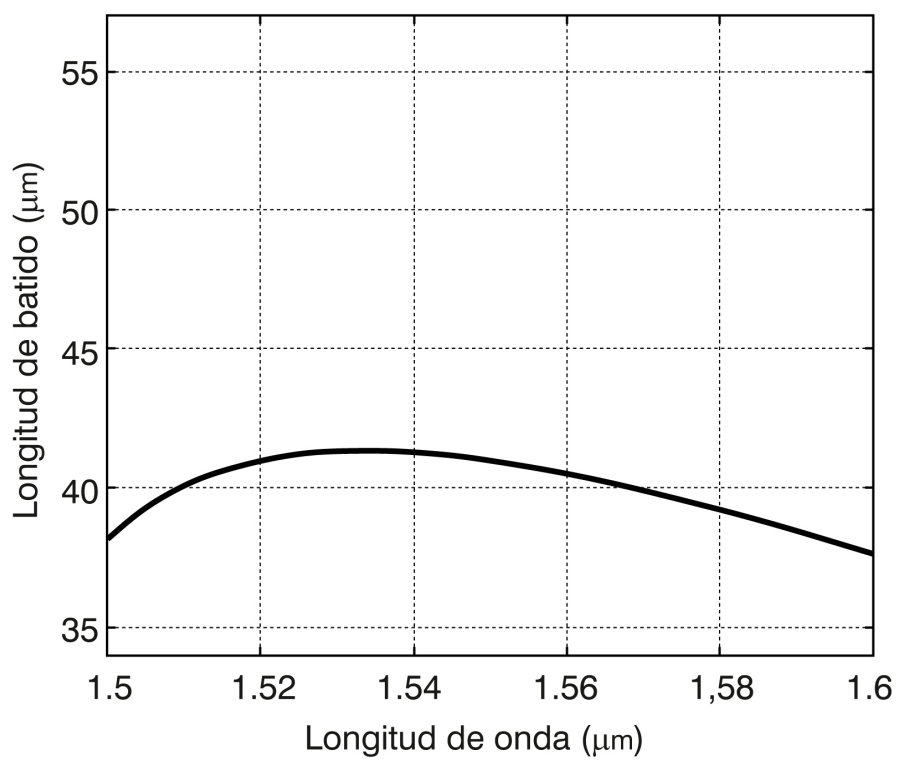
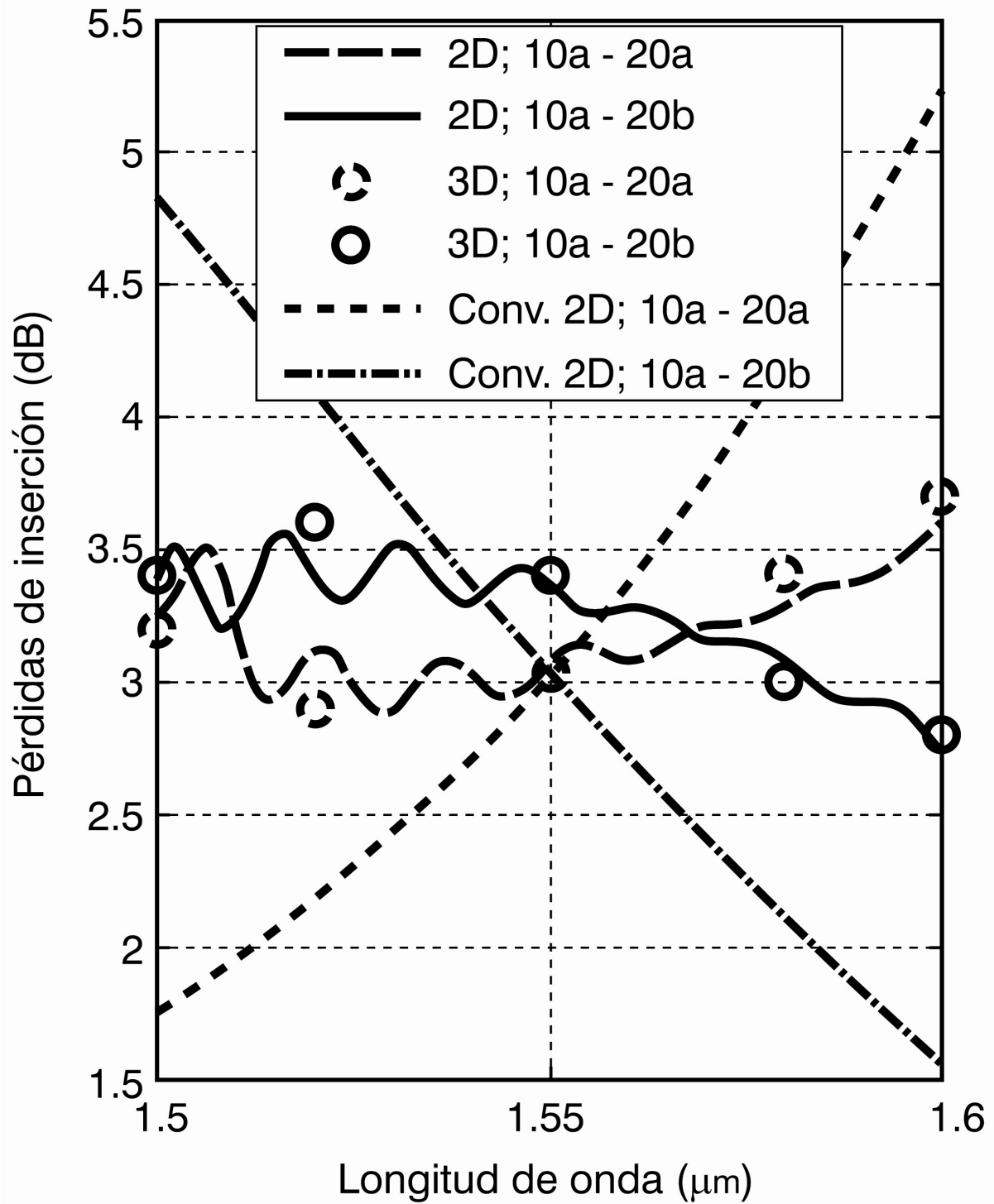


FIG. 6

**FIG. 7**

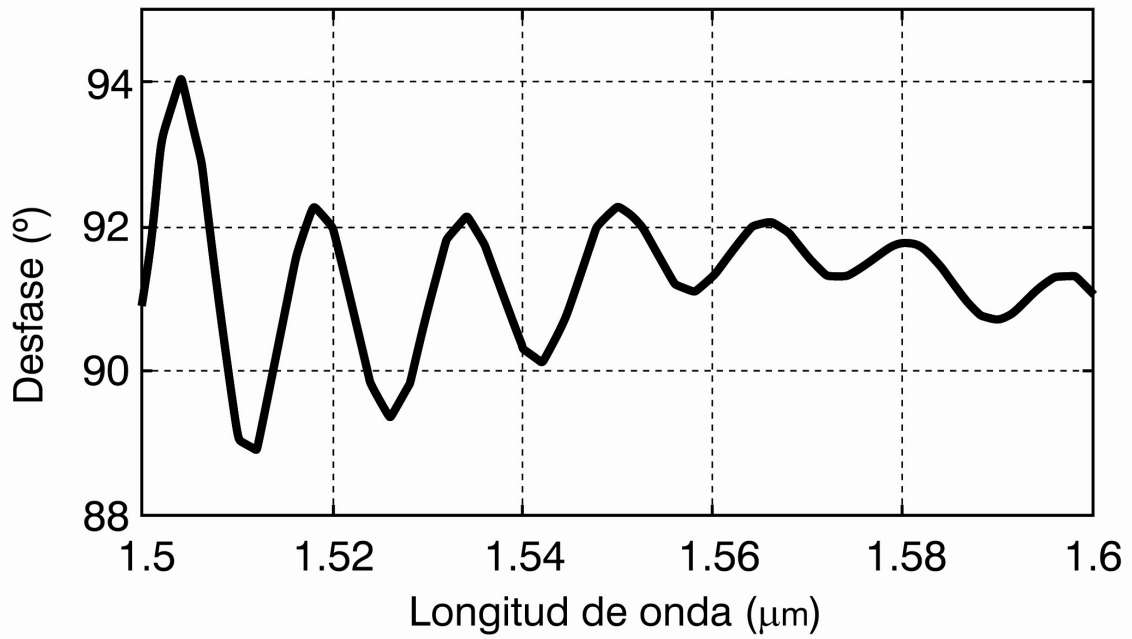


FIG. 8a

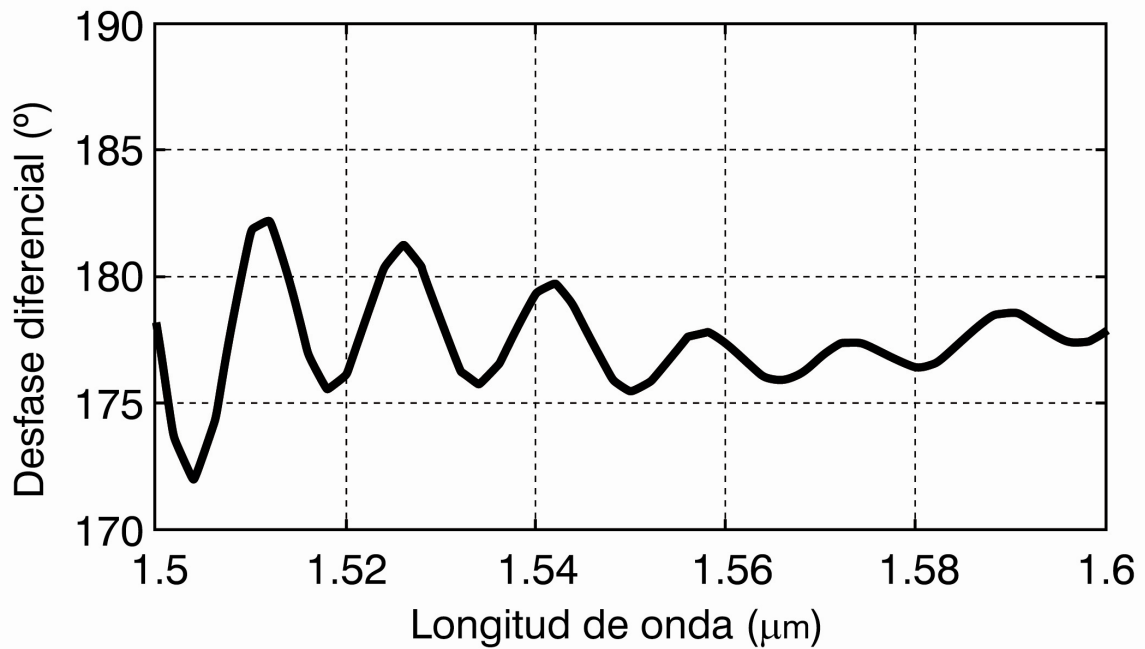


FIG. 8b

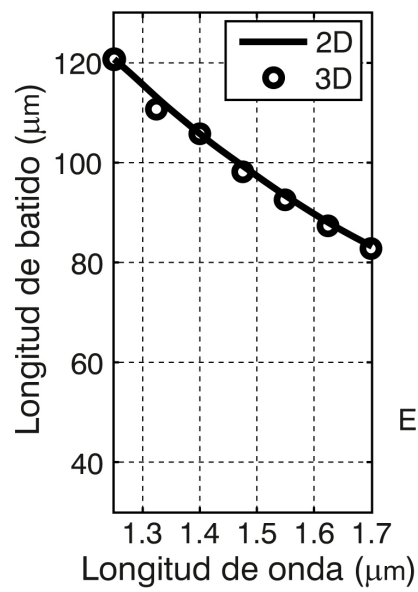


FIG. 9
ESTADO DE LA TÉCNICA

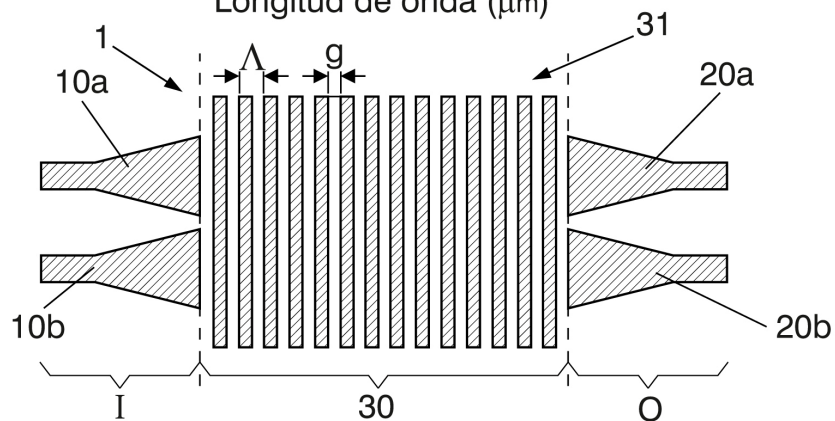


FIG. 10

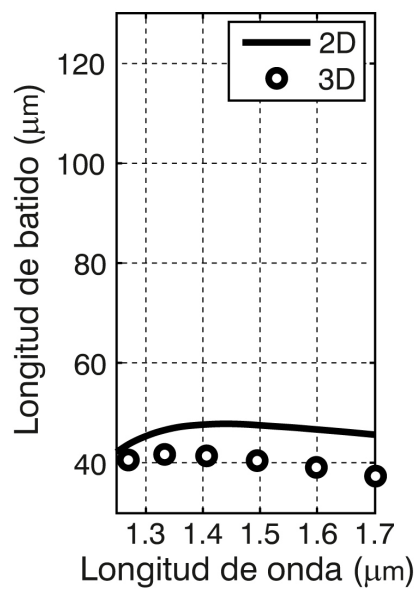


FIG. 11

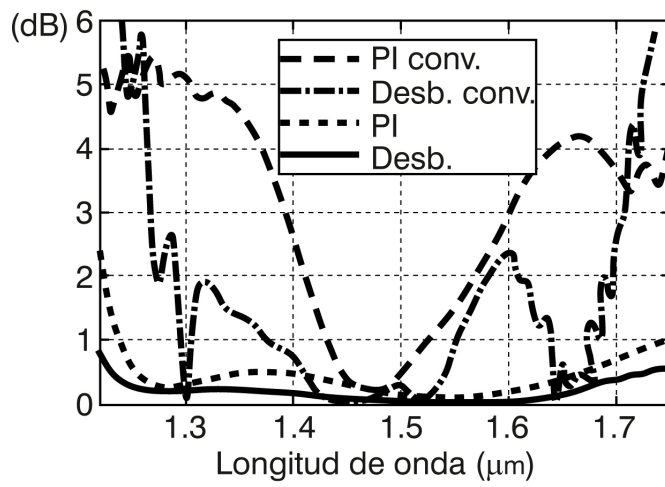


FIG. 12a

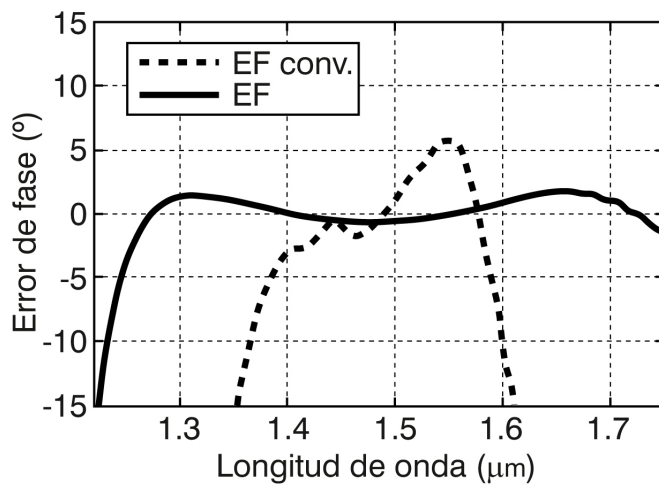


FIG. 12b

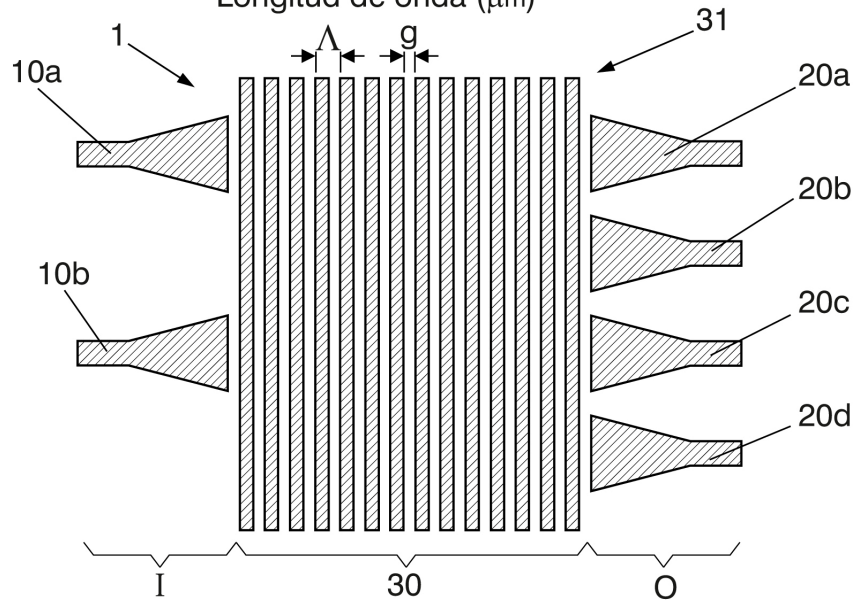
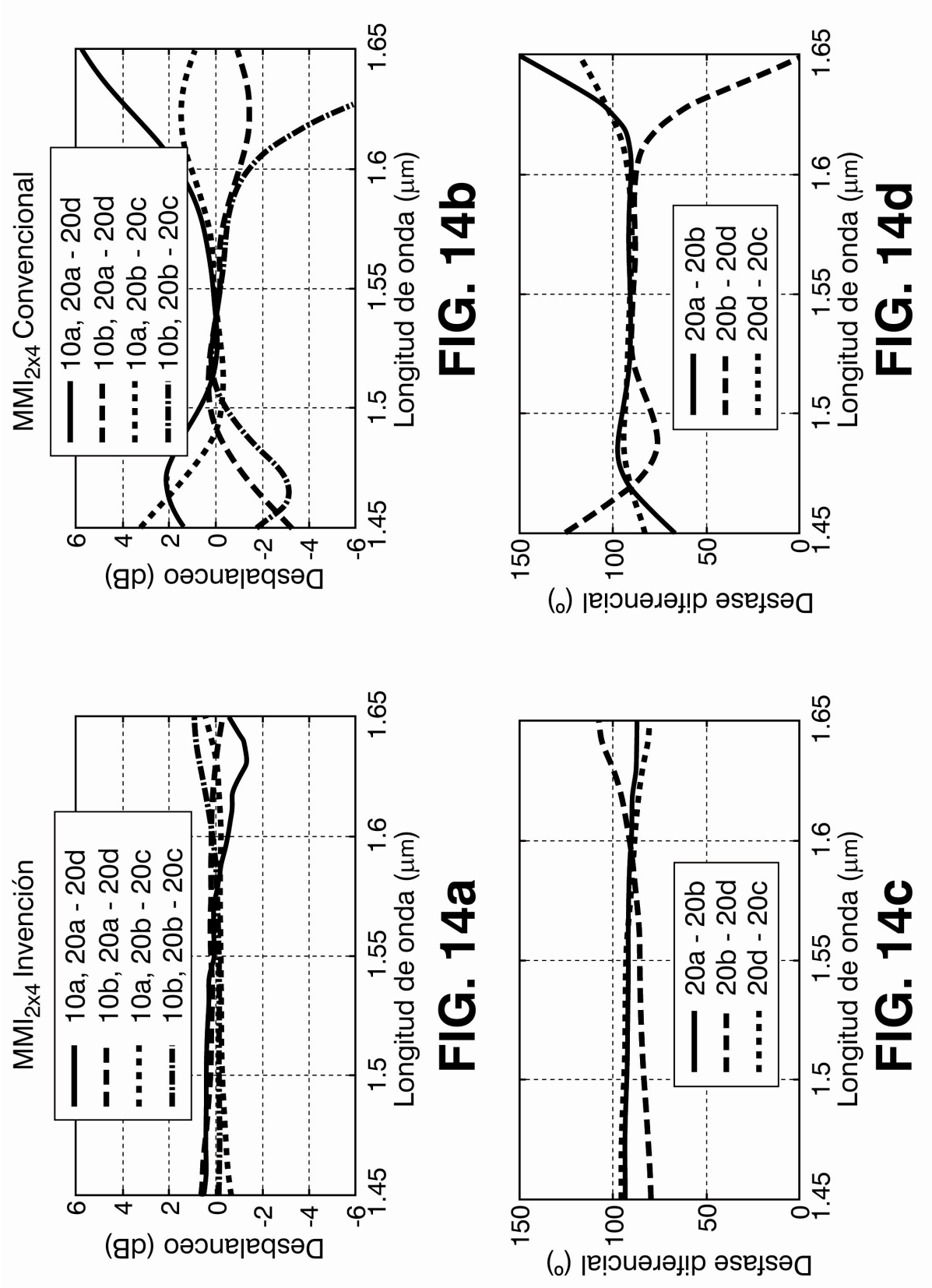


FIG. 13



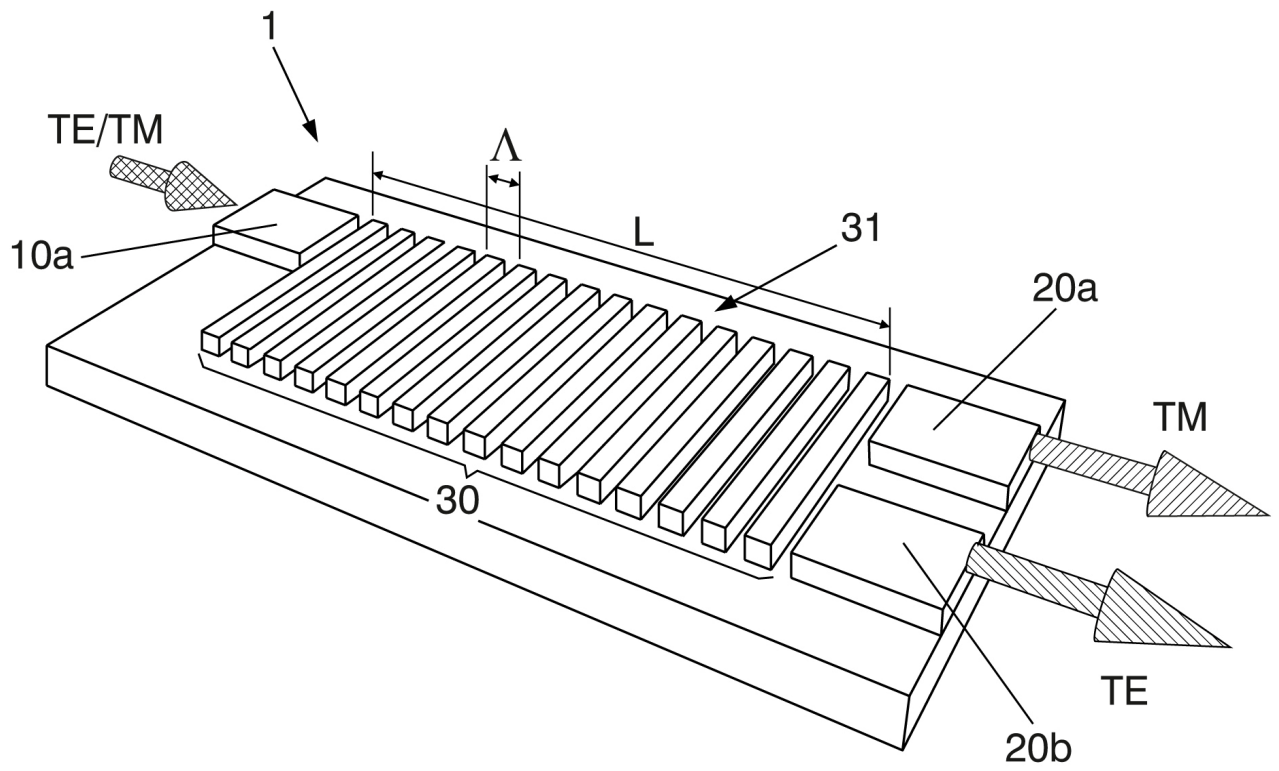


FIG. 15



OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②① N.º solicitud: 201230280

②② Fecha de presentación de la solicitud: 23.02.2012

③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤① Int. Cl.: **G02B6/34** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	ORTEGA-MOÑUX A e t al.. "High-Performance M ultimode Interference C oupler i n S ilicon Waveguides With Subwavelength Structures". IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 20111001 IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US. Vol. 23, No. 19, Páginas: 1406-1408. XP011360072 ISSN 1041-1135.	1-15
A	ROELKENS G. et al.. "Grating-Based Optical Fiber Interfaces for Silicon-on-Insulator Photonic Integrated Circuits". I EEE JO URNAL O F S ELECTED TOPICS I N Q UANTUM ELECTRONICS, 20110501 IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US. Vol. 17, No. 3, Páginas: 571-580. XP011326458 ISSN 1077-260X.	1-15

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
16.03.2012

Examinador
J. Botella Maldonado

Página
1/4

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.

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 16.03.2012

Declaración**Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)**

Reivindicaciones 1-15
Reivindicaciones

SI
NO

Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)

Reivindicaciones 1-15
Reivindicaciones

SI
NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	ORTEGA-MOÑUX A et al.. "High-Performance Multimode Interference Coupler in Silicon Waveguides With Subwavelength Structures". IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 20111001 IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US. Vol. 23, No. 19, Páginas: 1406-1408. XP011360072 ISSN 1041-1135.	
D02	ROELKENS G. et al.. "Grating-Based Optical Fiber Interfaces for Silicon-on-Insulator Photonic Integrated Circuits". IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, 20110501 IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US. Vol. 17, No. 3, Páginas: 571-580. XP011326458 ISSN 1077-260X.	

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

El documento D01 presenta un acoplador interferencial multimodo con estructuras de rejilla sub-longitud de onda en las zonas de revestimiento lateral para reducir el contraste de índice de refracción. El documento D02 hace un recorrido por el trabajo de los autores sobre transiciones, basadas en estructuras de rejilla, entre CI de fotónica en silicio y fibras ópticas monomodo.

Ambos documentos son sólo indicativos del estado de la técnica y no documentos significativos que pudieran afectar a la novedad o actividad inventiva del objeto de la invención. Por tanto en opinión del técnico que suscribe este informe, la invención tal como se reivindica en las reivindicaciones de la 1ª a la 15ª es nueva e implica actividad inventiva.