

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 736 899**

21 Número de solicitud: 201830653

51 Int. Cl.:

G02B 5/18 (2006.01)

G02B 5/30 (2006.01)

G02B 6/24 (2006.01)

G02B 27/26 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

29.06.2018

43 Fecha de publicación de la solicitud:

08.01.2020

71 Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA (75.0%)
Edf. Institutos Universitarios C/ Severo Ochoa, 4
Parque Tecnológico de Andalucía
29590 Campanillas (Málaga) ES y
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (25.0%)

72 Inventor/es:

HALIR, Robert;
LUQUE GONZÁLEZ, José Manuel;
HERRERO BERMELO, Alain;
ORTEGA MOÑUX, Alejandro;
MOLINA FERNÁNDEZ, Íñigo;
WANGÜEMERT PÉREZ, Juan Gonzalo y
VILLAFRANCA VELASCO, Aitor

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

54 Título: **GUÍA DE ONDA, MÉTODO DE FABRICACIÓN DE DICHA GUÍA DE ONDA Y DIVISOR DE POLARIZACIÓN QUE HACE USO DE DICHA GUÍA DE ONDA**

57 Resumen:

Guía de onda, método de fabricación de dicha guía de onda y divisor de polarización que hace uso de dicha guía de onda.

Guía de onda y divisor de polarización basado en dicha guía de onda, en los que se aplica un giro de un ángulo mayor de cero a una pluralidad de secciones de un material de núcleo y una pluralidad de secciones de un material de cobertura, consiguiendo así un control independiente de los índices de refracción de un modo transversal eléctrico de orden cero y un modo transversal magnético de orden cero. En este documento también se describe un método de fabricación de dicha guía de onda que permite modificar la birrefringencia de la luz que circula a través de la misma.

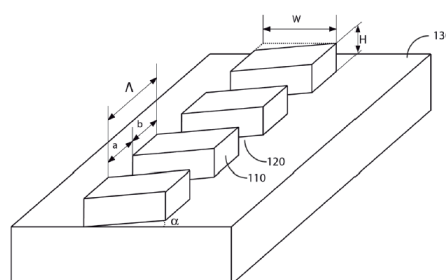


Fig. 1

DESCRIPCIÓN

GUÍA DE ONDA, MÉTODO DE FABRICACIÓN DE DICHA GUÍA DE ONDA Y DIVISOR DE POLARIZACIÓN QUE HACE USO DE DICHA GUÍA DE ONDA

5

Objeto de la invención

La presente invención se refiere al campo de óptica integrada, y más concretamente a dispositivos basados en guías de onda con estructuras sub-longitud de onda.

10

Antecedentes de la invención

15

La birrefringencia propia de las plataformas fotónicas, es decir, la diferencia de comportamiento de los dispositivos basados en guías de ondas entre la polarización transversal eléctrica (TE) y polarización transversal magnética (TM), supone uno de los grandes retos para el desarrollo y expansión de la óptica integrada. En particular, existen dos vías principales para enfrentarse a este problema: realizar estructuras independientes a la polarización (es decir, con el mismo índice efectivo y/o características dispersivas para TE y para TM) o desarrollar dispositivos de división de polarización (es decir, que separan en dos guías de salida los modos TE y TM, procesándose después de manera independiente, o descartando uno de ellos).

20

25

Independientemente de la alternativa seguida (independencia de polarización o selectividad de polarización), la dificultad surge a la hora de manipular la birrefringencia de las guías de onda utilizadas, ya sea para igualar la respuesta de los modos TE y TM o para hacerla tan dispar que permita su separación. En general, dadas las limitaciones de diseño obtenibles mediante la modificación geométrica de un único material y profundidad de grabado, la mayoría de soluciones en el estado del arte se basan en la incorporación de materiales adicionales al material de núcleo de la guía de onda, o al uso de estructuras con múltiples capas o profundidades de grabado. No obstante, estas alternativas incrementan notablemente la complejidad de fabricación de los dispositivos.

30

35

Por ejemplo, US 5,090,790 presenta una primera guía de onda independiente de la polarización en la que se introducen múltiples capas de pozos cuánticos dentro de la guía para controlar la birrefringencia de la misma. En un segundo ejemplo, US

2003/174982 A1 presenta una guía de onda independiente de la polarización alternativa en la que se deposita una cobertura electroóptica, controlada por un conjunto de electrodos que generan un campo eléctrico modificado en torno al núcleo de la guía, cuyo control activo permite igualar los índices efectivos de los modos TE y TM. Como se puede observar, en ambos casos es necesario recurrir a complejos procesos de fabricación y control, requiriendo materiales y geometrías no realizables con sistemas de fabricación de exposición única.

En cuanto a divisores de polarización, diversos fenómenos, materiales y estructuras ópticas han sido propuestos con el fin de implementar dichos divisores de polarización. Entre las alternativas propuestas caben destacar las redes de difracción sub longitud de onda, los cristales fotónicos, la refracción negativa presente en dichos cristales o la birrefringencia de forma (intrínseca de los materiales). No obstante, todas estas configuraciones presentan graves problemas a la hora de ser fabricadas, ya sea por una elevada sensibilidad a desviaciones respecto a los diseños nominales, inevitables durante el proceso de fabricación, bien por requerir geometrías o elementos auxiliares que no pueden ser implementados por los procedimientos habituales de fabricación de chips fotónicos comerciales.

Una posible solución a las limitaciones de fabricabilidad mencionadas es el uso de acopladores de interferencia multimodal (MMI, del inglés "*multimode interference coupler*"). Por ejemplo, US 5,838,842 presenta un MMI para división de polarización en dispositivos integrados. El MMI presenta una región de guía de onda multimodo (más conocida por su nombre en inglés, "*slab*") en la que se generan autoimágenes de los modos transversal eléctrico (TE) y transversal magnético (TM) a distintas longitudes. Dichas longitudes vienen determinadas por las diferencias en las constantes de propagaciones de ambos modos en la región de guía de onda multimodo. No obstante, puesto que la región de guía de onda multimodo es una guía de onda continua, las diferencias entre las constantes de propagación son pequeñas y poco controlables, resultando en dispositivos poco eficientes y que requieren elevadas distancias de propagación en la región de guía de onda multimodo, suponiendo por lo tanto un elevado tamaño total del dispositivo.

Nótese que los acopladores de interferencia multimodal (MMI) también han sido utilizados convencionalmente para la división de potencia, es decir, en lugar de separar dos polarizaciones en dos guías de onda de salida, separan parte de la

potencia de una única polarización en dos o más guías de onda de salida. Las prestaciones de los MMI como divisores de potencia, y en particular sus pérdidas y su ancho de banda, han sido mejorados mediante el uso de estructuras sub longitud de onda (en adelante SWG, por sus siglas inglés "*Sub-Wavelength grating*"), como se
5 presenta en ES 2,379,058. Nótese que las estructuras SWG de dicho divisor de potencia, además de ser perpendiculares a las guías de onda de entrada y salida, están diseñadas para operar en un amplio ancho de banda a una única polarización. Es decir, los parámetros geométricos de dicha estructura SWG están seleccionados de forma que se optimiza el ancho de banda del dispositivo a una polarización, siendo
10 el dispositivo inoperativo a la polarización ortogonal. En particular, la birrefringencia de la región de guía de onda multimodo implica longitudes de batido distintas para las polarizaciones TE y TM, por lo que las posiciones del MMI en las que se verifica la división de potencia son distintas para cada polarización, impidiendo su extracción conjunta. Es decir, en este tipo de dispositivos, la birrefringencia y la anisotropía de la
15 estructura SWG no son controlables durante diseño, sino que son consecuencia de sus parámetros geométricos.

Otra posible alternativa son los acopladores direccionales, en los que se produce un acoplo lateral entre dos guías monomodo adyacentes. No obstante, para que este
20 acoplo sea selectivo en polarización, y no una mera división de potencia (es decir, para que afecte únicamente al modo TE o TM, mientras que el otro modo continúa propagándose sin alteraciones en la guía de onda por la que se ha introducido), sigue siendo necesario controlar la birrefringencia de al menos una de las guías monomodo que lo conforman. Dicho control puede realizarse mediante la deposición de materiales
25 adicionales y/o elementos activos, con las desventajas ya mencionadas que dicha opción conlleva o, como ejemplifica CN 106,959,485 A, mediante el uso de estructuras SWG.

En el caso de CN 106,959,485 A, la estructura SWG se graba en un lateral de una de
30 las guías monomodo, mediante rendijas perpendiculares a la dirección de propagación de la luz que ocupan sólo parcialmente el núcleo de dicha guía. No obstante, esta geometría proporciona un control muy limitado de la birrefringencia de la guía, puesto que los efectos sobre los modos TE y TM de la estructura siguen estando ligados entre sí. Esta limitación a la hora de implementar independientemente los índices efectivos
35 de los modos TE y TM se traduce en prestaciones reducidas en cuanto a pérdidas de inserción, ratio de extinción y ancho de banda. Adicionalmente, la respuesta de esta

estructura sólo puede ajustarse modificando su periodo y ciclo de trabajo, lo que puede llegar a afectar al tamaño mínimo de rasgo del dispositivo (del inglés "*minimum feature size*") y por lo tanto no afecta a su dificultad de fabricación.

5 En definitiva, sigue existiendo por lo tanto en el estado de la técnica la necesidad de estructuras de guías de onda capaces de proporcionar un control de polarización eficiente, compacto y de gran ancho de banda, sin incrementar la complejidad de fabricación de los dispositivos.

10 Descripción de la invención

La presente invención soluciona los problemas anteriormente descritos mediante una guía monomodo con una estructura SWG que se encuentra rotada con un ángulo de giro respecto a la dirección de propagación de la luz guiada, lo cual permite modificar
15 las propiedades de birrefringencia de dicha guía. La guía monomodo aquí descrita puede integrarse junto con cualquier otra combinación de dispositivos en un chip fotónico, pudiendo ser fabricado durante el mismo paso de exposición que el resto de dichos dispositivos (al contrario que otras guías independientes de polarización o divisores de polarización que requieren múltiples profundidades de grabación, paredes
20 inclinadas, materiales adicionales, etc).

En un primer aspecto de la invención se presenta un dispositivo de guiado de birrefringencia modificada, entendiendo por "birrefringencia modificada" no un control en tiempo real de la birrefringencia de la guía de onda, sino una alteración constante de
25 dicha birrefringencia respecto a la de una guía de onda continua tradicional, siendo dicha alteración controlable durante una fase previa de diseño de la guía mediante la selección de las propiedades geométricas de la misma, y en particular, de un ángulo de una estructura SWG. El dispositivo de guiado de birrefringencia modificada hace uso de una guía de onda de birrefringencia modificada, comprendiendo por lo tanto
30 una estructura SWG, formada por una disposición alterna de una pluralidad de secciones de un material de núcleo y una pluralidad de secciones de material de cobertura, con un periodo menor que la longitud de onda de la luz guiada por dicha guía de onda de birrefringencia modificada. En particular, la estructura SWG está rotada un ángulo mayor que cero respecto a la dirección de propagación de la luz. Es
35 decir, los interfaces entre las secciones del material de cobertura y las secciones del material de núcleo presentan dicho ángulo con un plano perpendicular al eje de

propagación de la luz. Dicho ángulo permite controlar de manera independiente un primer índice efectivo para el modo transversal eléctrico de orden cero y un segundo índice efectivo para el modo transversal magnético de orden cero.

5 Nótese que, si bien otros parámetros geométricos SWG como el periodo o el factor de llenado pueden afectar a la anisotropía o la birrefringencia resultante, dicho efecto es significativamente menor que el producido por la rotación de los interfaces, limitando por lo tanto las prestaciones obtenibles por el divisor. Además, nótese que, al contrario que dichos parámetros (periodo y factor de llenado) el ángulo de giro no afecta al
10 tamaño mínimo de rasgo del dispositivo (del inglés "*minimum feature size*") y por lo tanto no incrementa su dificultad de fabricación.

Nótese asimismo, que el ángulo específico para el que se obtiene una cierta característica relacionada con la birrefringencia (por ejemplo una condición concreta
15 entre el primer índice efectivo para el modo transversal eléctrico de orden cero y el segundo índice efectivo para el modo transversal magnético de orden cero), depende del resto de características materiales y morfológicas de la guía, como son su altura, anchura, material de núcleo, material de cobertura, periodo SWG y factor de llenado SWG. Por lo tanto, dicho ángulo específico se determina preferentemente en una fase
20 de diseño anterior de acuerdo con el método del tercer aspecto de la presente invención.

Preferentemente, dichas condiciones concretas obtenidas mediante la selección del ángulo de giro de la estructura SWG pueden comprender tanto un comportamiento
25 independiente de polarización (es decir, un mismo valor para el primer índice efectivo del modo transversal eléctrico de orden cero y para el segundo índice efectivo del modo transversal magnético de orden cero) como un comportamiento selectivo en polarización (es decir, un valor significativamente distinto para el primer índice efectivo del modo transversal eléctrico de orden cero y para el segundo índice efectivo del
30 modo transversal magnético de orden cero).

También preferentemente, dependiendo de la realización particular, los parámetros geométricos (anchura, periodo, factor de llenado, ángulo) de la estructura SWG de la guía de onda de birrefringencia modificada pueden bien permanecer constantes a lo
35 largo de toda la guía, bien ser modificados de manera gradual o abrupta a lo largo de dicha guía, obteniendo así propiedades birrefringentes distintas en distintas posiciones

de la guía.

La geometría de las secciones de material de núcleo también puede variar entre implementaciones. En particular, tres opciones preferentes incluyen:

- 5 – Un segmento por cada sección, totalmente separados entre sí por el material de cubierta. Preferentemente, cada segmento presenta una forma mayormente rectangular o trapezoidal (vista sobre un plano paralelo a un interfaz entre una capa de material de núcleo y una capa de material de soporte).
- 10 – Múltiples segmentos por cada sección, quedando cada par de segmentos de una misma sección separados por una rendija o canal del material de cobertura.
- Secciones conectadas entre sí mediante una pluralidad de uniones centrales del material del núcleo, bien de anchura constante, bien de anchura variable.

15 La guía de onda de birrefringencia modificada está preferentemente implementado en silicio sobre aislante (SOI, del inglés "*Silicon on insulator*"), con un material de cobertura preferentemente seleccionada entre aire (es decir, no se incluye una capa de cobertura durante la fabricación, y el propio aire del entorno de aplicación de la guía actúa como material de cobertura), dióxido de silicio, y un polímero. Más
20 preferentemente, en el caso de utilizarse un polímero como material de cobertura, dicho polímero se selecciona de modo que presenta una variación de índice efectivo con la temperatura de signo opuesto a la variación del silicio. Es decir, al aplicarse un cambio de temperatura, la modificación en los índices efectivos de la estructura SWG ocasionada por la cubierta y el núcleo presentan signos opuestos, mitigándose así la
25 variabilidad de la respuesta de la guía frente a cambios ambientales.

Con el fin de optimizar las pérdidas de inserción en transiciones de entrada y salida de la guía monomodo de birrefringencia modificada (por ejemplo, en un interfaz con una guía de onda continua convencional, o con una guía SWG sin rotación), dicha
30 guías de onda de birrefringencia modificada comprende preferentemente al menos un adaptador modal. Los adaptadores modales comprenden estructuras SWG con una anchura variable y/o una rotación progresiva entre una dirección perpendicular a la guía de onda y el ángulo de rotación de la estructura SWG. También preferentemente, los adaptadores modales comprenden un puente central de anchura inversamente
35 proporcional a la anchura del adaptador. Por ejemplo, si una guía de onda continua con una primera anchura se conecta a través del adaptador modal a una guía de onda

de birrefringencia modificada con una segunda anchura, dicho adaptador modal incrementa progresivamente su anchura desde dicha primera anchura hasta dicha segunda anchura, mientras que el puente central disminuye progresivamente desde dicha primera anchura hasta una tercera anchura (menor que la primera anchura), o hasta desaparecer por completo al final del adaptador modal.

En un segundo aspecto de la invención, se presenta un sistema divisor de polarización basado en acoplo direccional selectivo en polarización, constituido a partir de la guía de onda monomodo de birrefringencia modificada del primer aspecto de la invención. El dispositivo comprende dos guías monomodo adyacentes (que denominaremos primera guía y segunda guía), de modo que cuando se introduce un modo transversal magnético de orden cero por la primera guía, se produce un acoplo a la segunda guía; mientras que cuando se introduce un modo transversal eléctrico de orden cero por la primera guía, no se produce dicho acoplo a la segunda guía.

Para conseguir dicho comportamiento selectivo en polarización, al menos la segunda guía monomodo comprende una estructura SWG cuyas interfaces entre la pluralidad de secciones del material de núcleo y la pluralidad de secciones del material de cobertura forman un ángulo mayor de cero con un plano perpendicular a una dirección de propagación de la luz guiada. Dependiendo de la implementación particular, la primera guía monomodo puede ser una guía de onda continua, una guía de onda SWG con interfaces perpendiculares a la dirección de propagación, o una guía de onda SWG girada con propiedades geométricas (anchura, ángulo de giro, periodo y/o factor de llenado) distintas a las de la segunda guía de onda.

Preferentemente, el comportamiento selectivo en polarización puede potenciarse incluyendo mediante una estructura central auxiliar dispuesta entre la primera guía de onda monomodo y la segunda guía de onda monomodo. En particular, dicha estructura auxiliar puede ser un segmento homogéneo de material de núcleo, un segmento homogéneo de un material distinto al material de núcleo, o una estructura heterogénea que combina múltiples materiales (por ejemplo, un metamaterial o una estructura SWG).

El control de birrefringencia proporcionado por la guía de onda del primer aspecto de la invención, al ser aplicado en el sistema de división de polarización por acoplo direccional descrito, permite reducir las dimensiones del sistema, al tiempo que se

optimizan el resto de prestaciones (pérdidas de inserción, ratio de extinción, ancho de banda, etc).

En un tercer aspecto de la invención, se presenta un método de fabricación de la guía de onda de birrefringencia modificada del primer aspecto de la invención y, en consecuencia, del sistema divisor de polarización del segundo aspecto de la invención. El método comprende, dados unos parámetros geométricos y/o materiales de la estructura SWG (por ejemplo, anchura, altura, ciclo de trabajo, periodo, material de cubierta, material de núcleo), determinar un ángulo de giro de la estructura SWG para obtener la relación objetivo entre el primer índice efectivo para el modo transversal eléctrico de orden cero y un segundo índice efectivo para el modo transversal magnético de orden cero. Dicha relación objetivo puede ser, por ejemplo, obtener un mismo valor para el primer índice efectivo y el segundo índice efectivo (guías independientes a la polarización), u obtener una diferencia mayor a un cierto umbral entre el valor del primer índice efectivo y el valor del segundo índice efectivo (guías selectivas a polarización). Nótese que los parámetros geométricos y/o materiales de la estructura SWG pueden ser parámetros fijos o ser modificados iterativamente dentro de un proceso de optimización. Nótese asimismo que tanto el comportamiento independiente a la polarización como el comportamiento selectivo a la polarización puede obtenerse para unos mismos parámetros geométricos y/o materiales de la estructura SWG, simplemente modificando el ángulo de giro de la estructura SWG. No obstante, los valores particulares del ángulo para dichos fines, dependerán de los valores particulares de dichos parámetros geométricos y/o materiales de la estructura SWG.

El cálculo del ángulo a introducir en la estructura SWG fabricada se realiza mediante computaciones numéricas de los índices efectivos generados por la estructura SWG rotada para dicho ángulo. En particular, dichas computaciones numéricas pueden realizarse mediante un algoritmo seleccionado de entre los algoritmos de simulación fotónica conocidos en el estado de la técnica, si bien se recomienda preferentemente una aproximación de la estructura SWG mediante una rotación de un tensor diagonal de un medio anisótropo homogéneo, reduciendo así la carga computación del método.

En particular, el método comprende preferentemente caracterizar la estructura SWG rotada mediante un tensor rotado ($\tilde{n}$) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\tilde{n} = \begin{bmatrix} \tilde{n}_{xx} & 0 & \tilde{n}_{xz} \\ 0 & \tilde{n}_{yy} & 0 \\ \tilde{n}_{xz} & 0 & \tilde{n}_{zz} \end{bmatrix}$$

donde:

$$\tilde{n}_{xx} = \sqrt{n_{xx}^2 \cos^2(\alpha) + n_{zz}^2 \sin^2(\alpha)},$$

$$\tilde{n}_{yy} = n_{yy},$$

$$\tilde{n}_{zz} = \sqrt{n_{xx}^2 \sin^2(\alpha) + n_{zz}^2 \cos^2(\alpha)},$$

$$\tilde{n}_{xz} = \sqrt{(n_{zz}^2 - n_{xx}^2) \sin(\alpha) \cos(\alpha)},$$

- 5 siendo $[n_{xx}, n_{yy}, n_{zz}]$ unas componentes del tensor diagonal (n) de un medio anisótropo homogéneo (es decir, de la estructura SWG sin girar).

La guía de onda, divisor de polarización y método de diseño descritos proporcionan por lo tanto un control de birrefringencia compacto, de bajas pérdidas y elevado ancho
10 de banda, fabricable en un único paso de litografía. Es decir, la mejora de prestaciones no lleva asociada ningún aumento de la complejidad de fabricación. Éstas y otras ventajas de la invención serán aparentes a la luz de la descripción detallada de la misma.

15 **Descripción de las figuras**

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, y para complementar esta descripción, se acompañan como parte integrante de la misma las
20 siguientes figuras, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo:

La figura 1 muestra esquemáticamente, en una vista en perspectiva, una guías de onda de birrefringencia modificada mediante rotación de estructuras sub-longitud de onda, de acuerdo con una realización preferente de la invención, ilustrando los
25 principales parámetros geométricos de dicha estructura.

La figura 2 ilustra, en una vista superior, una realización preferente de la guía de onda de birrefringencia modificada de la invención, en la que se selecciona el ángulo de giro

de forma que se obtiene un comportamiento independiente de la polarización.

La figura 3 presenta un divisor de polarización integrado basado en acoplo direccional con una guía de onda de birrefringencia modificada, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

La figura 4 ilustra el efecto del ángulo de giro sobre las propiedades anisótropas de una estructura SWG.

La figura 5 ilustra una gráfica donde se aprecia la variación del primer índice efectivo (n_{TE}) para el modo transversal eléctrico de orden cero (TE_0) y un segundo índice efectivo (n_{TM}) para el modo transversal magnético orden cero (TM_0) en función del ángulo (α) de giro de la estructura SWG.

Realización preferente de la invención

Nótese que las realizaciones preferentes del dispositivo (guía de onda monomodo de birrefringencia modificada) y de su sistema asociado (divisor de polarización basado en dicha guía) objeto de la invención se implementa preferentemente en silicio sobre aislante (SOI) para así beneficiarse del alto contraste de índice de SOI. Sin embargo, realizaciones particulares podrían implementarse en otras plataformas fotónicas diferentes. Es decir, todas las guías de onda del dispositivo se realizan preferentemente mediante un núcleo de silicio, depositado sobre una capa aislante como, por ejemplo, dióxido de silicio. El material de la cobertura puede variar para diferentes realizaciones de la invención, siendo algunas de las posibilidades dióxido de silicio, polímeros o aire, sin que esta lista limite el uso de otras posibles opciones.

Asimismo, nótese que las realizaciones preferentes del divisor de polarización de la invención están descritas con el sistema operando como divisor de polarización. No obstante, el mismo sistema puede operar de manera recíproca como multiplexor de polarización, es decir, combinando dos señales de polarizaciones ortogonales de dos guías de entrada en una misma guía de salida, simplemente invirtiendo la dirección de operación del dispositivo.

En cuanto a la fabricación de los dispositivos propuestos, nótese que las estructuras sublongitud de onda (SWG), independientemente de su ángulo de giro respecto al eje

óptico, no incrementan la dificultad ni el número de pasos respecto a la fabricación de guías de onda convencionales. Es decir, todas las estructuras utilizadas por el divisor de polarización de la invención pueden fabricarse mediante un único paso de exposición a profundidad completa de cualquier técnica de grabación microelectrónica convencional, como, por ejemplo, mediante exposición a haz de electrones ("e-beam" en inglés) o a ultravioleta profundo ("deep-UV" en inglés).

La figura 1 muestra de manera esquemática una realización preferente de una guía de onda (100), preferentemente monomodo, que permite el ajuste de la birrefringencia de la luz que pasa por al menos parte de dicha guía de onda (100) objeto de un primer aspecto de la invención, utilizada asimismo en una realización preferente del divisor de polarización (200) objeto de un segundo aspecto de la invención, así como sus parámetros geométricos principales.

La guía de onda (100) está formada por una disposición alterna periódica de secciones de un material de núcleo (110) y secciones de un material de cobertura (120) con un periodo (Λ) menor que la longitud de onda de una luz propagada por dicha disposición periódica de la guía de onda (100); teniendo además dispuestos entre las secciones de material de núcleo (110) y secciones de un material de cobertura (120) unos interfaces que están rotados un ángulo (α) respecto a un plano perpendicular a la dirección de propagación de la luz (es decir, perpendicular al eje principal de la guía de onda). Las secciones de material de núcleo (110) de la guía de onda (100) tienen una altura (H) y una anchura (W) y están dispuestas sobre un material de soporte (130) que actúa como capa aislante. Sobre esta estructura, se define un factor de llenado o ciclo de trabajo (f) como la relación entre la proporción de material de cobertura (a) y la proporción de material de núcleo (b) dentro de un periodo (Λ). Los valores particulares de todos estos parámetros geométricos se definen previamente a la fabricación del dispositivo mediante simulaciones numéricas de acuerdo con lo descrito por el método de la invención.

En particular, la guía de onda (100) se modela preferentemente como un tensor rotado ($\tilde{n}$) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\tilde{n} = \begin{bmatrix} \tilde{n}_{xx} & 0 & \tilde{n}_{xz} \\ 0 & \tilde{n}_{yy} & 0 \\ \tilde{n}_{xz} & 0 & \tilde{n}_{zz} \end{bmatrix}$$

donde:

$$\begin{aligned}\tilde{n}_{xx} &= \sqrt{n_{xx}^2 \cos^2(\alpha) + n_{zz}^2 \sin^2(\alpha)}, \\ \tilde{n}_{yy} &= n_{yy}, \\ \tilde{n}_{zz} &= \sqrt{n_{xx}^2 \sin^2(\alpha) + n_{zz}^2 \cos^2(\alpha)}, \\ \tilde{n}_{xz} &= \sqrt{(n_{zz}^2 - n_{xx}^2) \sin(\alpha) \cos(\alpha)},\end{aligned}$$

siendo [n_{xx} , n_{yy} , n_{zz}] unas componentes de un tensor diagonal (n) del medio anisótropo homogéneo equivalente a la estructura SWG sin rotar (es decir, de interfaces perpendiculares al eje principal de la guía de onda). Este modelado puede proporcionar un valor final del ángulo (α), o bien servir como una primera aproximación, refinada en una segunda etapa de cálculo mediante una simulación completa (es decir, sin aproximaciones de estructuras SWG como medios homogéneos) de la estructura.

La figura 2 presenta una vista superior esquematizada de una realización preferente de la guía de onda (100) de la invención (es decir, una vista en un plano paralelo al interfaz entre el soporte (130) y el núcleo (110), y en el que por lo tanto la luz se propaga siguiendo la dirección horizontal de la figura). La guía de onda (100) presenta un primer índice efectivo (n_{TE}) para el modo transversal eléctrico de orden cero (TE_0) y un segundo índice efectivo (n_{TM}) para el modo transversal magnético de orden cero (TM_0) a cada longitud de onda (λ). Dependiendo del ángulo (α), para unas determinadas condiciones geométricas y materiales, el primer índice efectivo (n_{TE}) puede ser igual al segundo índice efectivo (n_{TM}), o significativamente distinto a dicho segundo índice efectivo (n_{TM}). La diferencia necesaria para que se considere un valor "significativamente distinto" depende de la aplicación particular del dispositivo, pero de manera general, debe entenderse por esta expresión a una diferencia de características de propagación que permite un procesamiento diferencial de los modos TE_0 y TM_0 . Por ejemplo, en el caso de utilizarse la guía de onda (100) para implementar un divisor de polarización (200), se entiende por "significativamente distinto" a una diferencia de índice efectivo que da lugar al acoplo lateral del modo TM_0 entre guías adyacentes, mientras que dicho acoplo no ocurre para el modo TE_0 (debido a un mayor primer índice efectivo de dicho modo TE_0 respecto al segundo índice efectivo del modo TM_0 y, por lo tanto, un menor diámetro modal).

Con el fin de reducir las pérdidas por reflexión en los interfaces de la guía de onda (100), dicha guía de onda (100) puede comprender un adaptador modal (140) en cada extremo. Cada adaptador modal (140) presenta una al menos una estructura SWG con el mismo periodo (Λ) y ciclo de trabajo (f) que la guía de onda (100), mientras que su anchura varía progresivamente desde la anchura de una guía de onda monomodo hasta una anchura final de adaptador modal (140), preferentemente mayor que la anchura de guía de onda monomodo por lo que, de manera preferente, las estructuras SWG del adaptador modal (140) presentan una anchura incremental. Cada adaptador modal (140) comprende asimismo un puente central (141), esto es, un pequeño conector de material del núcleo en el centro de las secciones de material de cobertura (120). La anchura del puente central disminuye a medida que el ancho total del respectivo adaptador modal (140) aumenta, desapareciendo completamente en el interfaz con la estructura SWG rotada. Nótese que la geometría específica del adaptador modal (140) puede variar entre implementaciones siempre que se garantice una transición modal progresiva y suave.

La figura 3 presenta una realización particular de un divisor de polarización (200) correspondiente a un segundo aspecto de la invención y comprende un acoplador direccional que a su vez comprende, preferiblemente dispuestas adyacentes, una primera guía monomodo (210) y una segunda guía monomodo (220), siendo dicha segunda guía monomodo (220) una realización particular de la guía de onda (100) del primer aspecto de la invención. En este caso, la primera guía monomodo (210) es una guía de onda SWG con interfaces perpendiculares al eje de la luz guiada, y con sendos adaptadores modales (140) ubicados en sus extremos, si bien en otras realizaciones de la invención, la primera guía monomodo (210) puede ser una guía de onda continua o comprender estructuras SWG con otras geometrías alternativas.

Adicionalmente, el divisor de polarización (200) puede comprender una estructura central (230), dispuesta entre la primera guía monomodo (210) y la segunda guía monomodo (220), lo que permite potenciar las propiedades selectivas en polarización del sistema y mejorar sus prestaciones. En este ejemplo, la estructura central (230) es sencillamente un segmento rectangular preferiblemente homogéneo del mismo material que las secciones de material de núcleo (110). No obstante, en otras realizaciones particulares, la estructura central (230) puede implementarse mediante otras geometrías y/o materiales alternativos.

Durante su funcionamiento como divisor de polarización (200), se introducen los modos TE_0 y TM_0 en una misma entrada de la primera guía de onda monomodo (210). Mientras que el modo TM_0 se acopla a la segunda guía de onda monomodo (220), siguiendo el comportamiento general de cualquier acoplador direccional, el modo TE_0 queda confinado a la primera guía de onda monomodo (210) obteniendo así una división de polarización de alta eficiencia en un tamaño extremadamente reducido.

El proceso de fabricación del sistema divisor de polarización (200) se realiza preferentemente mediante un proceso de simulación fotónica que consta de dos etapas. En una primera etapa, se obtiene una primera aproximación del diseño mediante simulación de la estructura SWG como un material homogéneo y anisótropo. El material anisótropo utilizado se define a través de un tensor dieléctrico, obtenido mediante aproximaciones de Rytov. Fijando estos parámetros de partida, se realizan simulaciones fotónicas para un barrido de ángulos (α) de giro, modelando el efecto de dicho giro mediante las expresiones descritas para la guía de onda (100). Esta primera aproximación permite realizar simulaciones en tres dimensiones reduciendo el tiempo y coste computacional de simulación.

Una vez modeladas las propiedades anisótropas a distintos ángulos para la geometría y plataforma particulares bajo análisis, dicho modelado se aplica a una primera optimización mediante barrido de diversos parámetros como son la anchura de la zona multimodal, el ciclo de trabajo de la correspondiente estructura SWG real o la longitud del divisor de polarización. Dicho primer proceso de optimización se realiza ejecutando barridos de los parámetros mencionados e imponiendo como objetivos la minimización de pérdidas de inserción totales. Como resultado de esta optimización, se obtiene una aproximación de los parámetros de diseño iniciales (ángulo, separación entre guías, periodo, ciclo de trabajo y longitud de dispositivo).

A partir de los parámetros de diseño obtenidos en la primera etapa, se procede al modelado físico de la estructura SWG completa (sin aproximaciones a medio homogéneo) que nos proporciona el diseño final del divisor de polarización (200). Si bien este proceso puede realizarse manteniendo los grados de libertad de todos los parámetros de diseño, se recomienda simplificar este segundo proceso de optimización para reducir la carga computacional del mismo, fijando la anchura de la zona multimodal, el ciclo de trabajo, y el periodo (siempre imponiendo que dicho periodo quede fuera del régimen de Bragg, determinado por la relación de

proporcionalidad entre el periodo de la estructura SWG y la longitud de onda efectiva de la luz propagada por dicha estructura). Este segundo proceso de optimización se realiza preferentemente utilizando métodos tridimensionales de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD, del inglés '*Finite difference time domain method*'), si bien
 5 otras técnicas de computación fotónica pueden ser igualmente aplicadas al mismo.

La figura 4 presenta una variante del divisor de polarización (200) de la invención, en el que la guía de onda (100) con la que se implementa la segunda guía de onda (220) comprende una pluralidad de uniones centrales (140) que conectan las secciones de
 10 material de núcleo (110) de la estructura SWG. La pluralidad de uniones centrales (140), y en particular la selección de su anchura proporciona un grado de libertad adicional en el diseño del divisor de polarización (200), aumentando la capacidad de sintonización del primer índice efectivo (n_{TE}) para el modo transversal eléctrico de orden cero (TE_0) y del segundo índice efectivo (n_{TM}) para el modo transversal
 15 magnético orden cero (TM_0).

Finalmente, la figura 5 presenta de manera esquemática una variación del primer índice efectivo (n_{TE}) para el modo transversal eléctrico de orden cero (TE_0) y un segundo índice efectivo (n_{TM}) para el modo transversal magnético orden cero (TM_0) en
 20 función del ángulo (α) de giro de la estructura SWG. A pesar de que las dependencias particulares de estos índices con el ángulo (α) varían en función de los materiales utilizados y del resto de propiedades geométricas, cabe destacar que el efecto de dicho giro es mayor para el modo TE_0 que para el modo TM_0 , y además su variación tiene signos opuestos. Esto permite, por una parte, alterar las propiedades del primer
 25 índice efectivo (n_{TE}) sin modificar apenas la respuesta del segundo índice efectivo (n_{TM}), desarrollando así dispositivos selectivos en polarización; y por otra parte, determinar un ángulo para independencia de polarización (α_{ind}) en el que se verifica que tanto el primer índice efectivo (n_{TE}) como el segundo índice efectivo (n_{TM}) son iguales entre sí, tomando un valor de índice efectivo independiente de la polarización
 30 (n_{ind}).

A la vista de esta descripción y figuras, el experto en la materia podrá entender que la invención ha sido descrita según algunas realizaciones preferentes de la misma, pero que múltiples variaciones pueden ser introducidas en dichas realizaciones preferentes,
 35 sin salir del objeto de la invención tal y como ha sido reivindicada.

REIVINDICACIONES

1. Guía de onda (100) que comprende una pluralidad de secciones de un material de núcleo (110) y una pluralidad de secciones de un material de cobertura (120) dispuestas alternamente de manera periódica con un periodo (Λ) menor que la longitud de onda (λ) de una luz guiada a través la guía de onda (100); estando la guía de onda (100) caracterizada por que es monomodo y comprende unos interfaces respectivamente definidos entre cada una de la secciones de la pluralidad de secciones de material de núcleo (110) y cada una de las secciones de la pluralidad de secciones de material de cobertura (120) formando un ángulo (α) mayor de cero con respecto de un plano perpendicular a una dirección de propagación de la luz destinada a ser guiada por la guía de onda (100).
2. Guía de onda (100) de acuerdo con la reivindicación 1 caracterizado por que el ángulo (α) está seleccionado de modo que un primer índice efectivo (n_{TE}) de un modo transversal eléctrico de orden cero (TE_0) es distinto a un segundo índice efectivo (n_{TM}) de un modo transversal magnético de orden cero (TM_0).
3. Guía de onda (100) de acuerdo con la reivindicación 1 caracterizado por que el ángulo (α) está seleccionado de modo que un primer índice efectivo (n_{TE}) de un modo transversal eléctrico de orden cero (TE_0) es igual a un segundo índice efectivo (n_{TM}) de un modo transversal magnético de orden cero (TM_0).
4. Guía de onda (100) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que comprende al menos un adaptador modal (140) conectado a una entrada de la guía de onda (100), comprendiendo dicho al menos un adaptador modal (140) una pluralidad de secciones de material de núcleo (110) y secciones de material de cobertura (120) dispuestas de manera alternada y periódica con un periodo (Λ) menor que la longitud de onda (λ) de una luz guiada por el al menos un adaptador modal (140), y estando dispuesta la pluralidad de secciones de material de núcleo (110) con ángulos progresivos entre un plano perpendicular a la dirección de propagación de la luz guiada y el ángulo (α).
5. Guía de onda (100) de acuerdo con la reivindicación 4 caracterizada por que el

- al menos un adaptador modal (140) comprende una pluralidad de puentes centrales (141) de material de núcleo que une la pluralidad de secciones del material de núcleo (110) de dicho adaptador modal (140), siendo la anchura de cada puente central (141) inversamente proporcional a la anchura del adaptador modal (140).
- 5
6. Guía de onda (100) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 4 y 5 caracterizado por que las secciones del material del núcleo (210) del al menos un adaptador modal (140) tienen una anchura variable.
- 10
7. Guía de onda (100) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizada por que la pluralidad de secciones de material de núcleo (110) y la pluralidad de secciones de material de cobertura (120) presentan propiedades geométricas constantes a lo largo de la longitud de la guía de onda (100).
- 15
8. Guía de onda (100) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6 caracterizada por que la pluralidad de secciones de material de núcleo (110) y la pluralidad de secciones de material de cobertura (120) presentan propiedades geométricas variables a lo largo de la longitud de la guía de onda (100).
- 20
9. Guía de onda (100) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizada por que la pluralidad de secciones de material de núcleo (110) presentan al menos una ranura interna del material de cobertura.
- 25
10. Guía de onda (100) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 caracterizada por que la pluralidad de secciones de material de núcleo (110) presentan una pluralidad de uniones centrales (150) del material de núcleo.
- 30
11. Guía de onda (100) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizada por que el material de las secciones de material de núcleo (110) es silicio.
- 35
12. Guía de onda (100) de acuerdo con la reivindicación 11 caracterizada por que el material de las secciones de material de cobertura (120) es dióxido de silicio.

13. Guía de onda (100) de acuerdo con la reivindicación 11 caracterizada por que el material de las secciones de material de cobertura (120) es un polímero con una variación de índice efectivo con el valor de temperatura con signo opuesto a la variación del silicio de las secciones de material de núcleo (110).
5
14. Guía de onda (100) de acuerdo con la reivindicación 13 caracterizada por que la proporción de material de cobertura respecto al material de las secciones de material de núcleo (110) dentro de un periodo (Λ) está seleccionado de modo que se minimiza una variación con la temperatura del primer índice efectivo (n_{TE}) y del segundo índice efectivo (n_{TM}).
10
15. Divisor de polarización (200), que comprende una primera guía de onda (210) y una segunda guía de onda (220) adyacentes dispuestas a una distancia (d), caracterizado por que al menos la segunda guía de onda (220) es una guía de onda (100) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14.
15
16. Divisor de polarización (200) de acuerdo con la reivindicación 15 caracterizado por que la primera guía de onda (210) es una guía de onda continua.
20
17. Divisor de polarización (200) de acuerdo con la reivindicación 15 caracterizado por que la primera guía de onda (210) es una guía de onda con una pluralidad de secciones de un material de núcleo (110) y una pluralidad de secciones de un material de cobertura (120) dispuestas alternamente de manera periódica con un periodo (Λ) menor que la longitud de onda (λ) de la luz guiada.
25
18. Divisor de polarización (200) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 15 a 17 caracterizado por que comprende además una estructura central (230) dispuesta entre la primera guía de onda (210) y la segunda guía de onda (220).
30
19. Divisor de polarización (200) de acuerdo con la reivindicación 18 caracterizado por que la estructura central (230) es un segmento homogéneo de material de núcleo.
35
20. Divisor de polarización (200) de acuerdo con la reivindicación 18 caracterizado

por que la estructura central (230) es un segmento homogéneo de un material distinto al material de núcleo.

21. Divisor de polarización (200) de acuerdo con la reivindicación 18 caracterizado por que la estructura central (230) es una estructura heterogénea que combina múltiples materiales.

22. Método de fabricación de la guía de onda (100) descrita en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14 caracterizado por que comprende, dados un material de núcleo y un material de cobertura de la guía de onda (100), disponer una pluralidad de secciones de material de núcleo (110) y una pluralidad de secciones de material de cobertura (120) definiendo entre cada una de las secciones de material de núcleo (110) y cada una de las secciones de material de cobertura (120) unos interfaces que respectivamente forman un ángulo (α) mayor de cero con respecto de un plano perpendicular a una dirección de propagación de la luz destinada a ser guiada por la guía de onda (100).

23. Método de acuerdo con la reivindicación 22, caracterizado por que el ángulo (α) se determina mediante aproximación de la guía de onda (100) haciendo uso un tensor rotado ($\tilde{n}$), resultante de rotar un tensor diagonal (n) de un medio anisótropo homogéneo.

24. Método de acuerdo con la reivindicación 23, caracterizado por que comprende calcular el tensor rotado ($\tilde{n}$) según:

$$\tilde{n} = \begin{bmatrix} \tilde{n}_{xx} & 0 & \tilde{n}_{xz} \\ 0 & \tilde{n}_{yy} & 0 \\ \tilde{n}_{xz} & 0 & \tilde{n}_{zz} \end{bmatrix}$$

con:

$$\tilde{n}_{xx} = \sqrt{n_{xx}^2 \cos^2(\alpha) + n_{zz}^2 \sin^2(\alpha)},$$

$$\tilde{n}_{yy} = n_{yy},$$

$$\tilde{n}_{zz} = \sqrt{n_{xx}^2 \sin^2(\alpha) + n_{zz}^2 \cos^2(\alpha)},$$

$$\tilde{n}_{xz} = \sqrt{(n_{zz}^2 - n_{xx}^2) \sin(\alpha) \cos(\alpha)},$$

siendo [n_{xx} , n_{yy} , n_{zz}] unas componentes del tensor diagonal (n) del medio anisótropo homogéneo.

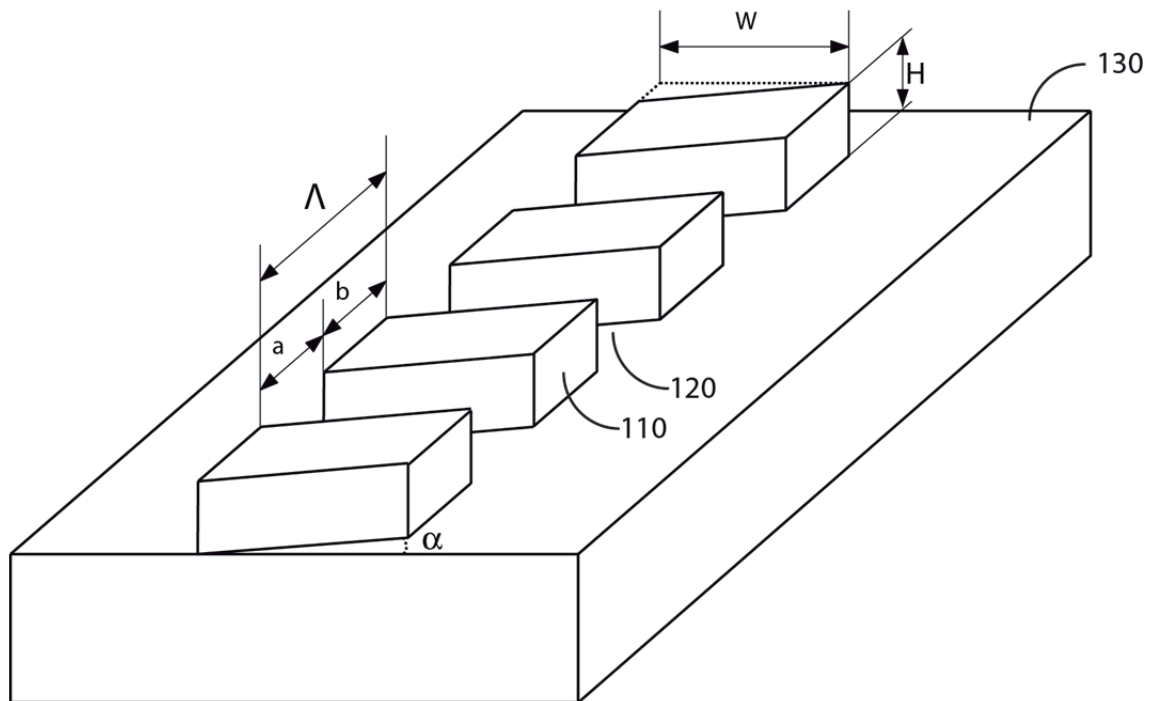


Fig. 1

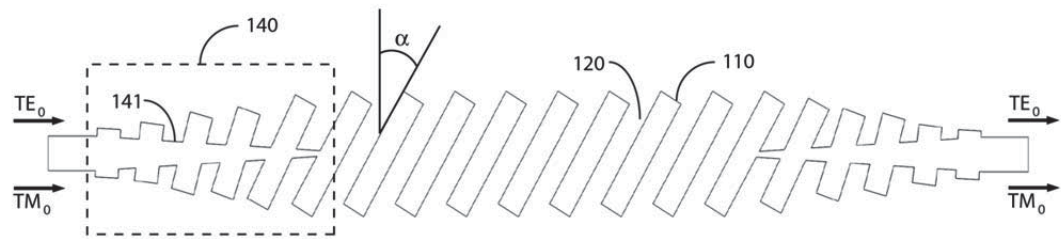


Fig. 2

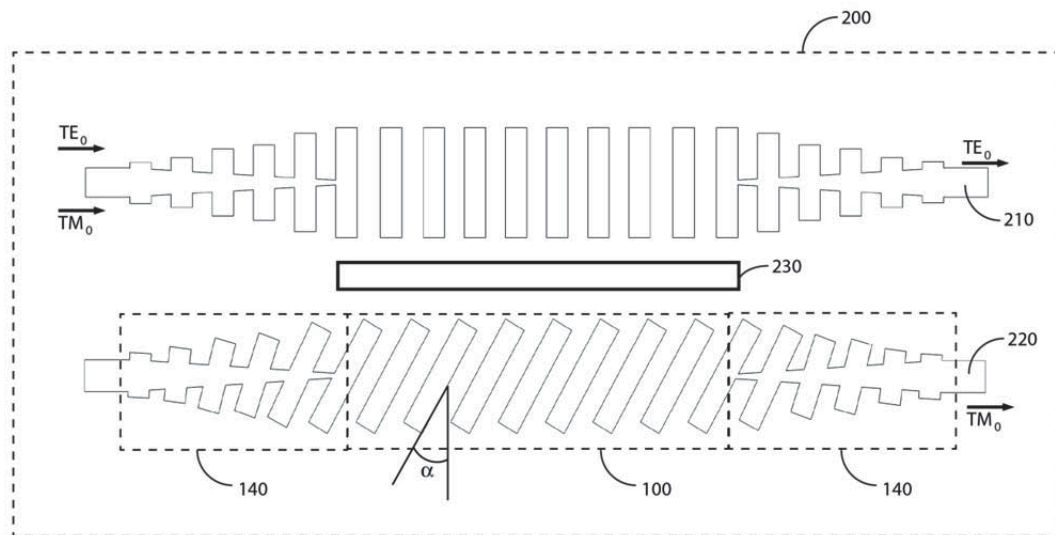


Fig. 3

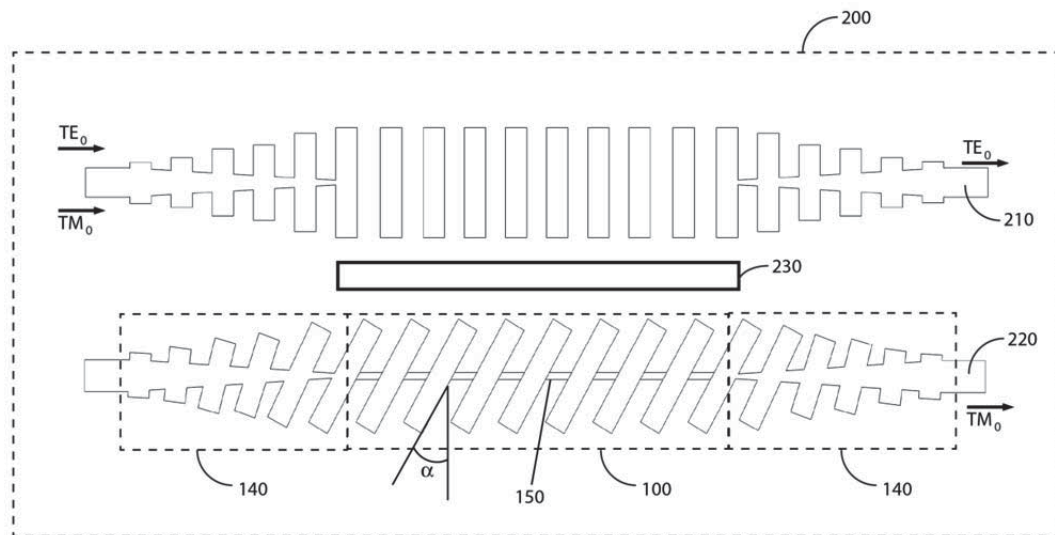


Fig. 4

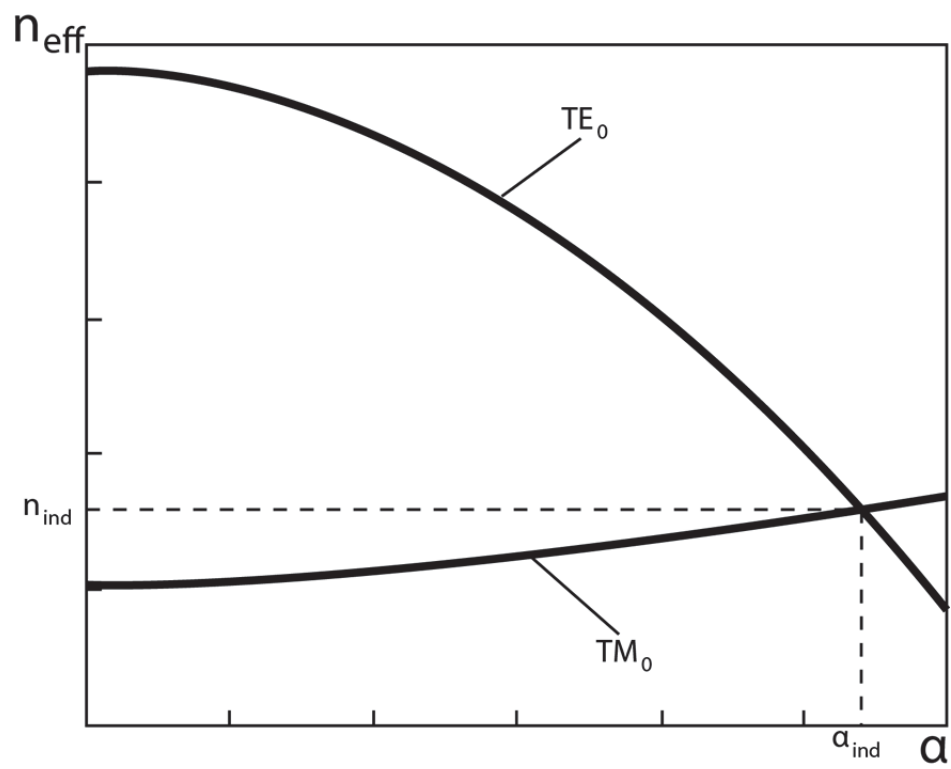


Fig. 5



- ②① N.º solicitud: 201830653
②② Fecha de presentación de la solicitud: 29.06.2018
③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	HASMAN E et al. Polarization beam-splitters and optical switches based on space-variant computer-generated subwavelength quasi-periodic structures. Optics Communicat, 20020801 ELSEVIER, AMSTERDAM, NL. Yao Jianping; Azañón Jose, 01/08/2002, Vol. 209, Nº 1-3, Páginas 45 - 54,XP004372245 ISSN 0030-4018, <DOI: 10.1016/S0030-4018(02)01598-5>	1-24
A	MAESE-NOVO et al. Wavelength independent multimode interference coupler. Optics Express, 25/03/2013, Vol. 21, Páginas 7033-7040 [en línea][recuperado el 12/11/2018]. Recuperado de Internet <URL: http://www.researchgate.net/publication/236097272_Wavelength_independent_multimode_interference_coupler >, <DOI: 10.1364/OE.21.007033>	1-24
A	TAILLAERT D et al. A compact two-dimensional grating coupler used as a polarization splitter. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 20030901 IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US. , 01/09/2003, Vol. 15, Nº 9, Páginas 1249 - 1251, XP011427167 ISSN 1041-1135, <DOI: 10.1109/LPT.2003.816671>	1-24

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
04.12.2018

Examinador
J. Botella Maldonado

Página
1/2

CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

G02B5/18 (2006.01)

G02B5/30 (2006.01)

G02B6/24 (2006.01)

G02B27/26 (2006.01)

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.