

(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la
Propiedad Intelectual
Oficina internacional



(43) Fecha de publicación internacional
04 de noviembre de 2021 (04.11.2021) **WIPO | PCT**

(10) Número de publicación internacional
WO 2021/219913 A1

(51) Clasificación internacional de patentes:

G02B 5/18 (2006.01) G02B 6/24 (2006.01)

G02B 5/30 (2006.01)

(21) Número de la solicitud internacional:

PCT/ES2021/070279

(22) Fecha de presentación internacional:

27 de abril de 2021 (27.04.2021)

(25) Idioma de presentación:

español

(26) Idioma de publicación:

español

(30) Datos relativos a la prioridad:

P202030367 29 de abril de 2020 (29.04.2020) ES

(71) Solicitante: **UNIVERSIDAD DE MÁLAGA** [ES/ES];

Avenida Cervantes, 2, 29071 Málaga (ES).

(72) Inventores: **WANGÜEMERT PÉREZ, Juan Gonzalo**;

OTRI - Universidad de Málaga, C/ Severo Ochoa,

4 (P.T.A.), Campanillas, 29590 Málaga (ES). **MOLINA**

FERNÁNDEZ, Íñigo; OTRI - Universidad de Málaga,

C/ Severo Ochoa, 4 (P.T.A.), Campanillas, 29590 Málaga

(ES). **ORTEGA MOÑUX, Alejandro**; OTRI - Universi-

dad de Málaga, C/ Severo Ochoa, 4 (P.T.A.), Campanillas,

29590 Málaga (ES). **HALIR, Robert**; OTRI - Universi-

dad de Málaga, C/ Severo Ochoa, 4 (P.T.A.), Campanillas,

29590 Málaga (ES).

(81) Estados designados (a menos que se indique otra cosa,

para toda clase de protección nacional admisible): AE, AG,

AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,

BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK,

DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,

GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG,

(54) Title: BRICKED SUB-WAVELENGTH PERIODIC WAVEGUIDE, MODAL ADAPTER, POWER DIVIDER AND POLARISATION SPLITTER THAT USE SAID WAVEGUIDE

(54) Título: GUÍA DE ONDA PERIÓDICA SUB-LONGITUD DE ONDA ENLADRILLADA, ADAPTADOR MODAL, DIVISOR DE POTENCIA Y DIVISOR DE POLARIZACIÓN QUE HACEN USO DE DICHA GUÍA DE ONDA

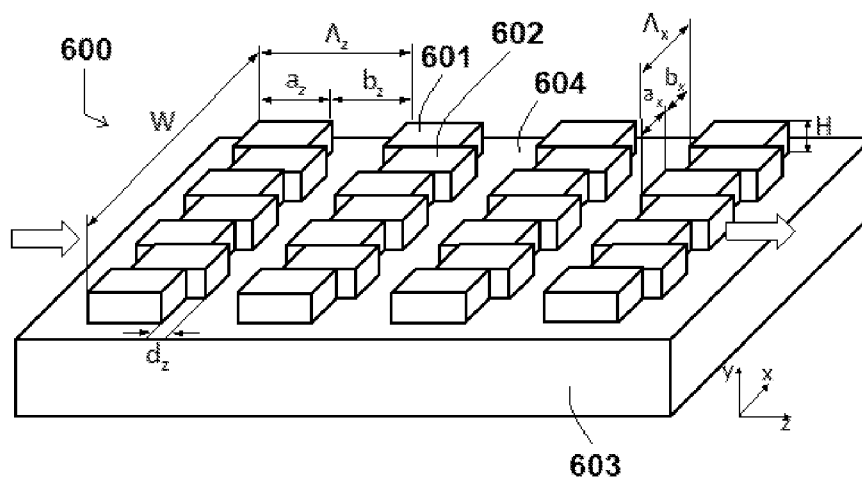


Fig. 6

(57) Abstract: Disclosed are a bricked sub-wavelength periodic waveguide and a modal adapter, power divider and polarisation splitter that use said waveguide. The waveguide (600) comprises blocks (601, 602) disposed periodically with a period "Lz" on a substrate (603) and which alternate with a covering material (604). The first blocks (601) have a width "ax" and the second blocks (602) have a width "bx", alternating on the substrate (603) according to a period "Lx", the second blocks (602) being displaced a distance "dz" the first blocks (601) in the direction of propagation. Also disclosed are a modal adapter (1100), a power divider (1200) and a polarisation splitter (1500) that all use the periodic waveguide (600) and can operate with larger wave periods without leaving the sub-wavelength regime.

(57) Resumen: Guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, adaptador modal, divisor de potencia y divisor de polarización que hacen uso de dicha guía de onda. La guía de onda (600) comprende unos bloques (601, 602) dispuestos de manera periódica con un

[Continúa en la página siguiente]

KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) Estados designados (*a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible*): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publicada:

— con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))

periodo "Lz" sobre un sustrato (603) alternados con un material de cobertura 5 (604), estando unos primeros bloques (601) de ancho "ax" y unos segundos bloques (602) de ancho "bx", alternados sobre el sustrato (603) según un periodo "Lx", y estando los segundos bloques (602) desplazados una distancia "dz" en la dirección de propagación respecto de los primeros bloques (601). Además, un adaptador modal (1100), un divisor de potencia (1200) y un divisor de polarización (1500), que hacen todos uso de la guía de onda periódica (600) y 10 que pueden operar con periodos de onda mayores sin salirse del régimen sub-longitud de onda.

GUÍA DE ONDA PERIÓDICA SUB-LONGITUD DE ONDA ENLADRILLADA, ADAPTADOR MODAL, DIVISOR DE POTENCIA Y DIVISOR DE POLARIZACIÓN QUE HACEN USO DE DICHA GUÍA DE ONDA

DESCRIPCIÓN

OBJETO DE LA INVENCION

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

El objeto principal de la invención es una guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, que conserva las propiedades que tienen las guías de onda convencionales de controlar el valor del índice efectivo de los modos que soportan, así como su dependencia con la longitud de onda, pero que incorpora la posibilidad de controlar también su anisotropía.

La invención presenta una gran ventaja, y es que puede operar con periodos mayores sin salirse del régimen sub-longitud de onda. Es decir, que para acometer su fabricación se van a requerir unos tamaños mínimos de rasgo mayores (del inglés *minimum feature size*), lo que facilita su fabricación en masa con técnicas de ultravioleta profundo (*deep-UV* en inglés). Asimismo, otros dos objetos de la invención son dos dispositivos que hacen uso de dicha nueva guía de onda, un divisor de potencia y un divisor de polarización.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

La fotónica es la rama de la ciencia que estudia la generación, manipulación y detección de la luz (fotones). El espectro electromagnético que cubre es muy amplio. En orden creciente de longitudes de onda (λ), abarca las siguientes bandas: ultravioleta (λ : 0.01-0.38 μm), visible (λ : 0.38-0.78 μm), infrarrojo cercano (λ : 0.78-2 μm), infrarrojo medio (λ : 2-50 μm) e infrarrojo lejano (λ : 50-1000 μm). Al igual que ocurrió con los circuitos electrónicos integrados, la fotónica integrada (*Photonic Integrated Circuits*, PIC, en inglés) tiene por objetivo la integración en un solo chip de todos los dispositivos y bloques funcionales necesarios para el procesamiento de la luz.

Los dispositivos y circuitos fotónicos se construyen combinando materiales con índice de

refracción diferente. Las prestaciones y tamaño de los dispositivos fabricados dependen del contraste o diferencia de índice de refracción de los materiales utilizados. La plataforma de silicio (*Silicon on Insulator*, SOI, en inglés) es la plataforma que mayoritariamente se ha impuesto en la banda del infrarrojo cercano, que, junto con el visible, es la banda donde mayor número de aplicaciones se están desarrollando.

La plataforma SOI tiene varias ventajas. La primera es que el elevado contraste de índice de refracción entre el silicio ($n_{\text{Si}}=3.476$) y el dióxido de silicio ($n_{\text{SiO}_2}=1.44$) usados, respectivamente, como núcleo y sustrato/cubierta de las guías de onda ópticas, permite reducir la sección transversal de las guías de interconexión o hilos fotónicos, sus radios de curvatura ($< 5 \mu\text{m}$), y, en general, el tamaño de los dispositivos.

En la figura 1 se muestra un ejemplo de una guía de onda convencional (100), que comprende un núcleo (101) de ancho W y grosor H . El núcleo (101) se apoya en un sustrato (102) y se encuentra cubierto por aire u otro material de cubierta (103) entrando una onda luminosa por un primer extremo (104) y saliendo por el extremo opuesto (105).

La segunda gran ventaja de la plataforma SOI es que para la fabricación de los circuitos fotónicos se pueden seguir usando los procesos de fabricación CMOS (Semiconductor Complementario de Óxido Metálico) que se han venido empleando en los circuitos electrónicos integrados, los cuales se encuentran fuertemente consolidados y maduros.

A pesar de las ventajas que ha supuesto la tecnología SOI en el ámbito de la óptica integrada, el hecho de tratarse de una tecnología de alto contraste trae consigo varios inconvenientes. El más importante de todos es la dificultad de diseñar dispositivos de altas prestaciones, fundamentalmente de gran ancho de banda.

Para poder lograr dispositivos de altas prestaciones es necesario poder sintetizar tanto el valor deseado de índice efectivo (ingeniería del índice o *index engineering* en inglés), como controlar su dependencia con la longitud de onda (ingeniería de la dispersión, o *dispersion engineering* en inglés).

En guías de ondas convencionales en la plataforma SOI, la dificultad viene provocada por la fuerte dependencia que el índice efectivo del modo que se propaga por la estructura tiene con el tamaño eléctrico de la guía. Al venir fijado el grosor H por cuestiones de fabricación, sólo se dispone del ancho W para controlar el valor del índice efectivo. Ello provoca que la guía de

onda convencional presente, a pesar de estar hecha con materiales isotrópicos, unas características de propagación muy diferentes para las polarizaciones Transversal Eléctrica (TE, o *in-plane*) y Transversal Magnética (TM o *out-of-plane*), lo que se conoce como birrefringencia.

5

En determinadas aplicaciones, es necesario controlar el grado de birrefringencia, aumentándolo, por ejemplo, para diseñar dispositivos sensibles a la polarización, o disminuyéndolo, para dispositivos insensibles a la polarización.

10

La irrupción en el campo de la fotónica de las guías de ondas dieléctricas periódicas sub-longitud de onda (SWG por sus siglas en inglés *Sub-Wavelength Grating*) ha sido fundamental para mejorar considerablemente las prestaciones de los dispositivos. El alto grado de madurez alcanzado por las estructuras SWG en la banda del infrarrojo cercano, su versatilidad, y sobre todo el amplio abanico de dispositivos en los que ha demostrado ser muy útil, la han convertido

15

hoy en día en una tecnología imprescindible en el diseño de muchos dispositivos.

Con carácter ilustrativo, la figura 2 muestra la geometría general de una guía de onda SWG (200) dieléctrica habitualmente utilizada en óptica integrada. Comprende unas barras (201) de ancho W , grosor H y longitud a_z , separados entre sí una distancia b_z . Las barras (201)

20

tienen una periodicidad Λ_z , que debe ser igual a la suma de a_z y b_z . Las barras (201) son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, señalada con una flecha en la figura 2, en dirección del eje z .

25

Las barras (201) se encuentran apoyados sobre un sustrato (202), cuyo índice de refracción es inferior al índice de refracción del material utilizado en las barras (201). El espacio entre barras (201) es rellenado con un material cubierta (203), pudiendo ser su índice de refracción igual al del sustrato (202), inferior o incluso superior. Lo que nunca debe ser es superior al índice de refracción del material usado en las barras (201). Los modos o soluciones electromagnéticas soportados por las guías de onda SWG (200) presentan distribuciones de

30

campo periódicas y se denominan modos Floquet.

35

El régimen de funcionamiento de las guías de onda SWG (200) queda determinado por dos parámetros, el periodo, indicado en la figura 2 como Λ_z , y el ciclo de trabajo (DC, del inglés '*Duty Cycle*') o factor de relleno que es igual al cociente entre la longitud a_z y el periodo Λ_z ($DC=a_z/\Lambda_z$). Dependiendo del cociente entre la longitud de onda de operación (λ) y el periodo (Λ_z), las guías de onda SWG (200) presentan tres zonas de funcionamiento diferentes que se

denominan zona de radiación, zona de Bragg y zona sub-longitud de onda o SWG.

En la figura 3 se muestra, a modo explicativo, cómo varía el índice efectivo del modo Floquet (n_{eff}) en función de dicho cociente para una zona de radiación (301), una zona de Bragg (302) y una zona sub-longitud de onda (303), siendo n_{eff} en la zona de Bragg (302) igual a $\lambda/2\Lambda_z$. Para que las guías de onda SWG (200) trabajen en el régimen sub-longitud de onda o SWG, es necesario que el cociente entre la longitud de onda de operación (λ) y el periodo (Λ_z) no sea inferior a dos veces el índice efectivo del modo, es decir se debe cumplir que $\lambda/\Lambda_z > 2 \cdot n_{eff}$.

El hecho de que las guías de onda SWG (200) posean dos nuevos grados de libertad, el ciclo de trabajo (DC) y el periodo (Λ_z), les dota de una gran potencialidad a la hora de diseñar dispositivos. Variando el ciclo de trabajo (DC) es posible hacer ingeniería del índice de refracción, es decir, controlar el valor del índice efectivo del modo en el rango de longitudes de onda de interés ($\Delta\lambda$).

En la figura 4 se muestra, a modo explicativo, el efecto que tiene sobre la curva de dispersión del modo la variación del ciclo de trabajo de la guía de onda SWG (200) desde un valor DC_1 a un valor inferior DC_2 . Por otra parte, variando el periodo (Λ_z), es posible hacer ingeniería de la dispersión, es decir, controlar la dependencia con la longitud de onda que tiene el índice efectivo del modo en el rango de longitudes de onda de interés ($\Delta\lambda$).

En la figura 5 se muestra, a modo explicativo, el efecto que sobre la curva de dispersión tiene disminuir el periodo desde un valor Λ_{z1} a un valor inferior Λ_{z2} . En relación con la presente invención, es importante darse cuenta que variar el ciclo de trabajo (de DC_1 a DC_2) o el periodo (de Λ_{z1} a Λ_{z2}) para hacer, respectivamente, ingeniería del índice o ingeniería de la dispersión, afecta al valor de longitud de onda en que empieza la zona Bragg. En ambos casos, las longitudes de onda donde empieza la zona Bragg se han desplazado desde λ_{B1} a λ_{B2} .

En el documento P201830653 se presenta una nueva potencialidad de las guías de onda SWG (200). Si las barras (201) de la figura 2 que conforman la guía de onda SWG (200) son girados un cierto ángulo respecto de la dirección de propagación, según el eje z en la figura, es posible controlar de manera independiente los índices efectivos de los modos transversal eléctrico (TE) y transversal magnético (TM), es decir, es posible hacer ingeniería de la birrefringencia. En dicho documento se demuestra cómo se ve modificada la matriz tensorial

que caracteriza la anisotropía de una guía de onda SWG (200) en función del ángulo de giro.

Un aspecto importante a ser destacado de lo presentado en el documento P201830653, que lo diferencia de la solución que se propone en esta invención, es que a medida que se va aumentando el ángulo de giro, el periodo de la estructura en la dirección de propagación también aumenta en un factor $1/\cos(\alpha)$, siendo α el ángulo de giro. Es decir, la capacidad de controlar la anisotropía está acoplada al tamaño del periodo, por lo que ambos parámetros no pueden ser elegidos independientes el uno del otro.

La capacidad que tienen las guías de onda SWG (200) de controlar las propiedades electromagnéticas del modo se consiguen sin necesidad de utilizar múltiples profundidades de grabado o incorporar materiales adicionales. Por lo tanto, en un mismo chip fotónico pueden integrarse dispositivos que hagan uso de guías de onda SWG (200) con dispositivos que hagan uso de guías de onda convencionales (100), y fabricarse todo durante el mismo paso de grabado.

A pesar de los enormes beneficios que ha supuesto la utilización de la tecnología SWG a frecuencias ópticas, su fabricación sigue siendo su principal limitación. Para poder trabajar en la zona de funcionamiento SWG y no entrar en la zona Bragg, es necesario que los periodos cumplan la condición $\Lambda_z < \lambda/(2 \cdot n_{\text{eff}})$. Operando en el infrarrojo cercano ($\lambda=1.55 \mu\text{m}$) y en la plataforma SOI (n_{eff} entre 2 y 2.5), eso significa que los periodos (Λ_z) deben ser como mucho del orden de los 300 ó 350 nm.

Si además se desea trabajar lejos de la zona Bragg, o zona profunda de la zona SWG ($\Lambda_z \ll \lambda/(2 \cdot n_{\text{eff}})$, (*deep-SWG* en inglés), los periodos requeridos son incluso más restrictivos, del orden de los 100 nm. Ello implica que, si el ciclo de trabajo es del 50 %, las barras de silicio deben tener longitudes en la dirección de propagación entre 150 nm, si se opera cerca de la zona Bragg para hacer ingeniería de la dispersión, y 50 nm, si se opera lejos de la zona Bragg para hacer ingeniería del índice de refracción.

Para la fabricación en masa de circuitos fotónicos, y la consiguiente reducción de costes, la tecnología de fabricación que se suele emplear es la DUV-193 (del inglés *Deep Ultra Violet* 193 nm). Los tamaños mínimos de rasgo (MFS, del inglés '*minimum feature size*') que el DUV-193 es capaz de conseguir es superior a los 100 nm. Por lo tanto, cuanto mayores sean los MFS que requieran nuestros circuitos y aplicaciones, en comparación con el que nos pueda garantizar la tecnología de fabricación, mayores serán los rendimientos de fabricación (*yields*,

en inglés).

Es por ello, que la gran mayoría de dispositivos fotónicos que se han venido proponiendo y que hacen uso de guías de onda SWG (200) no han podido aún ser explotados desde un punto de vista comercial, quedando limitada su validación experimental al ámbito de la investigación, en donde se suele emplear la técnica de grabación microelectrónica de exposición a haz de electrones (*e-beam* en inglés), cuyo MFS puede llegar a alcanzar los 50 nm.

En definitiva, en el ámbito de la óptica integrada existe la necesidad de disponer de guías de onda que puedan seguir aprovechando todas las ventajas que desde el punto de vista de diseño de dispositivos ofrecen las guías de onda SWG (200) (ingeniería del índice, de la dispersión y de la anisotropía), pero que desde el punto de vista de su fabricación requieran unos MFS mayores, y por tanto menos exigentes, para facilitar su explotación comercial.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La presente invención resuelve los problemas planteados anteriormente, y para ello se propone, como primer objeto de invención, una guía de onda periódica sub-longitud de onda (SWG, *subwavelength*), que por sus características estructurales se denominará “enladrillada”.

Las ventajas que presenta la nueva guía periódica son las siguientes. En primer lugar, conserva todas las propiedades que tienen las guías de onda SWG convencionales de controlar las propiedades electromagnéticas de los modos (ingeniería del índice e ingeniería de la dispersión), y además incorpora la posibilidad de controlar también la anisotropía, y por tanto, también la birrefringencia resultante. A diferencia de otras soluciones comentadas en la sección de antecedentes, el control de la anisotropía no afecta al periodo (Λ_z) en la dirección de propagación.

La segunda ventaja que presentan, derivada de la anterior, es que es capaz de operar con periodos (Λ_z) mayores, sin que ello signifique salirse del régimen SWG y entrar en el modo de operación Bragg. Esto significa que para su fabricación se van a poder aumentar los tamaños mínimos de rasgo o MFS (*Minimum Feature Size*) requeridos, lo que va a facilitar su fabricación en masa mediante técnicas litográficas DUV (Deep-UltraViolet).

La guía periódica sub-longitud de onda enladrillada, primer objeto de la invención, no necesita incorporar nuevos materiales o aumentar el número de pasos de grabado, por lo que se podría integrar con hilos fotónicos convencionales, con guías de onda SWG convencionales, o con dispositivos que hagan uso de los mismos, en un mismo chip y fabricarse todo durante el mismo paso de grabado.

A continuación, se van a describir los cuatro objetos de invención, que hacen todos uso de la guía de onda periódica, primer objeto de la invención:

- un primer objeto de invención, como se ha indicado, es una guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, que soporta los dos modos fundamentales de cada una de las polarizaciones (TE y TM),
- un segundo objeto de invención es un adaptador modal, es decir una transición entre guías o hilos fotónicos convencionales y la guía de onda periódica, primer objeto de invención, y viceversa, desde la guía de onda periódica a guías de onda convencionales,
- un tercer objeto de invención es un divisor de potencia, de 3dB-90° preferentemente, que hace uso de las guías de onda periódicas, primer objeto de invención, y
- un cuarto objeto de invención, que es un divisor de polarización de los modos TE_0 y TM_0 y que hace uso de las guías de onda periódicas sub-longitud de onda enladrilladas.

A continuación, se describe en detalle cada uno de ellos.

El primer objeto de invención, la guía de onda periódica, comprende un sustrato, sobre el que se disponen periódicamente, en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda, con un periodo Λ_z , unas barras de material de núcleo de largo a_z y alto H . Entre barra y barra se disponen unos huecos de un material cubierta, que puede ser aire o cualquier otro material.

El periodo (Λ_z) que se elija en la dirección de propagación de la onda puede ser mayor del que resulta al aplicar la condición $\Lambda_z < \lambda/(2 \cdot n_{\text{eff}})$ en una guía de onda periódica convencional, y aun así seguir estando en el régimen de funcionamiento sub-longitud de onda.

Para ello, la guía de onda periódica objeto de la invención tiene dos características fundamentales. La primera consiste en que las barras de material del núcleo están divididas en unos primeros bloques de ancho ' a_x ' y unos segundos bloques de ancho ' b_x '.

Estos bloques de anchos diferentes se alternan en la dirección transversal a la de propagación de la onda (dirección x), de manera que se disponen un bloque de ancho ' a_x ', un bloque de ancho ' b_x ', un bloque de ancho ' a_x ', y así sucesivamente.

- 5 La segunda característica es que todos los segundos bloques de longitud ' b_x ' están desplazados una distancia ' d_z ' en la dirección de propagación (dirección z), respecto de los primeros bloques de ancho ' a_x '.

10 El efecto que tiene el desplazamiento ' d_z ' de los segundos bloques es que en las curvas de dispersión del índice efectivo es diferente para los modos TE que para los modos TM. Para los modos TE, el desplazamiento ' d_z ' es capaz de anular el efecto del incremento del periodo Λ_z . Es decir, si en guías de onda SWG el incremento del periodo Λ_z lo que produce es un aumento del valor del índice efectivo y un aumento de su dependencia con la longitud de onda, al hacer el desplazamiento ' d_z ' a los segundos bloques de ancho ' b_x ', las curvas de
15 dispersión del modo TE sufren el efecto contrario, es decir, disminuyen su valor de índice efectivo y también se aplanan con la longitud de onda.

La disminución del índice efectivo es lo que favorece que tamaños de periodos Λ_z que en guías de onda SWG implicarían que determinadas longitudes de onda de interés se
20 encuentren operando en zona Bragg, por no cumplir la relación $\Lambda_z < \lambda/(2 \cdot n_{\text{eff}})$, pasen ahora a trabajar en zona sub-longitud de onda en guías de onda periódicas de aspecto enladrillado, como las de la presente invención, al sí cumplirla.

Por su parte, las curvas de dispersión de los modos TM apenas se ven afectadas por el
25 desplazamiento ' d_z ' de los segundos bloques de ancho ' b_x '. Este comportamiento tan diferente para las polarizaciones TE y TM dota a las guías de onda periódicas de aspecto enladrillado, de una enorme potencialidad para controlar la birrefringencia y diseñar dispositivos selectivos a la polarización, como divisores de polarización.

30 En definitiva, la gran ventaja que tienen las guías de onda periódicas enladrilladas de la presente invención es que son capaces de operar con periodos Λ_z mayores que los que usan las guías de onda SWG convencionales, y al mismo tiempo mantener intacta su capacidad de control sobre el índice efectivo de los modos, a saber:

- capacidad para controlar el valor del índice efectivo (ingeniería del índice),
- 35 - capacidad para controlar su dependencia con la longitud de onda (ingeniería de la dispersión), y

- capacidad para controlar su comportamiento selectivo con la polarización (ingeniería de la birrefringencia).

También preferentemente, dependiendo de la realización particular, los parámetros geométricos de la guía de onda periódica, como anchura (W), periodos (Λ_z y Λ_x), ciclo de trabajo (DC) y desplazamiento (d_z) pueden, bien permanecer constantes a lo largo de toda la guía de onda periódica, o bien ser modificados de manera gradual o abrupta a lo largo de la guía de onda, obteniendo así propiedades distintas en distintas posiciones de la guía.

La guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada está preferentemente implementada en silicio sobre aislante (SOI), con un material cubierta que preferentemente puede seleccionarse entre aire, dióxido de silicio, y un polímero. Más preferentemente, en el caso de utilizarse un polímero como material cubierta, dicho polímero se selecciona de modo que presenta una variación del índice de refracción con la temperatura de signo opuesto a la variación del silicio. Es decir, al aplicarse un cambio de temperatura, la modificación en los índices de refracción de los bloques de material núcleo y material cubierta presentan signos opuestos, mitigándose así la variabilidad de la respuesta de la guía de onda periódica frente a cambios ambientales.

Un segundo objeto de la presente invención es un adaptador modal de transición entre guías de onda convencionales y las guías de onda periódicas sub-longitud de onda enladrilladas, y viceversa. El adaptador modal, tiene la función de minimizar las pérdidas de inserción entre ambos tipos de guías de onda. Los adaptadores modales comprenden dos zonas. Una primera zona, para convertir una guía de onda convencional de cierto ancho en una guía de onda SWG del mismo ancho.

Para ello, el núcleo de la guía de onda convencional es troceado en trozos de longitud ' Λ_z ', coincidente con el periodo de la guía SWG a la que se quiere convertir. Cada uno de dichos trozos, es a su vez dividido en dos partes, de longitud respectiva ' a_z ' y ' b_z ', coincidentes con las longitudes de las barras y huecos de la guía SWG a la que se quiere convertir. A lo largo de la primera zona del adaptador modal, el ancho de los trozos de longitud ' b_z ' se va disminuyendo de manera progresiva hasta desaparecer. La segunda zona del adaptador modal, para convertir la guía de onda SWG que resulta de la primera zona en la guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada (primer objeto de la invención) deseada. Para ello, preferentemente, los adaptadores modales varían periodo a periodo y de manera gradual el desplazamiento ' d_z ', al tiempo que se incrementa el ancho de la guía de onda periódica hasta

conseguir los valores finales de ancho y de desplazamiento deseados.

Un tercer aspecto de la invención es un divisor de potencia, de 3dB-90° preferentemente, que hace uso de las guías de onda periódicas sub-longitud de onda enladrilladas, primer objeto de invención. El divisor, también denominado acoplador, se diseña para operar preferentemente con la polarización TE, al ser esta la polarización que más se beneficia de emplear las guías de onda periódicas. El divisor de potencia comprende un dispositivo de interferencia multimodal (en inglés MMI, *Multimode Interference Device*) el cual se basa en el principio de las autoimágenes o efecto Talbot espacial.

El divisor de potencia, preferentemente implementado en SOI, comprende al menos una guía de onda de entrada, que recibe un modo transversal eléctrico (TE), preferentemente el modo fundamental, y dos guías de salida en las que aparece el modo de entrada con la mitad de potencia cada uno y un desfase de 90 ° entre ellos. Todas las guías de entrada y salida del divisor de potencia están formadas por guías de onda convencionales. La parte central del acoplador es una guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, lo suficientemente ancha para soportar varios modos Floquet. El acceso a la guía de onda periódica se produce por uno o dos puertos de entrada, formados por guías de onda periódicas de acceso.

Entre las ondas periódicas y las guías de entrada y salida al divisor de potencia se posicionan unos adaptadores modales, descritos en el segundo aspecto de la invención. El diseño del MMI basado en guías de ondas periódicas se realiza de modo similar a como se realiza el diseño de un MMI hecho con guías homogéneas convencionales, o un MMI con guías SWG convencionales. A continuación, se resumen los principales pasos:

- Se determinan los anchos y separación de las guías de onda periódicas de acceso con que se va a acceder a la parte central del divisor de potencia, es decir, al MMI. En principio, cuanto más anchas sean las guías de onda periódicas de acceso y más próximas se sitúen mejor. Las guías de onda periódicas de acceso deben estar completamente desacopladas en el tramo de longitud típico que tienen los adaptadores modales.
- Se elige un primer ancho de la guía de onda periódica central aproximadamente igual a la suma de los anchos de las guías de onda periódicas de acceso y dos veces la distancia de separación entre ellas.
- Se varían el periodo (Λ_z) y el desplazamiento (d_z) que maximiza el MFS y logra una respuesta de la longitud de batido de los dos primeros modos del MMI los más plana posible en el rango de longitudes de onda de interés.

- Se determina la longitud óptima del MMI para que las pérdidas de exceso medidas en las guías de onda de salida presenten un mínimo, compatibles con un desbalanceo también pequeño y un desfase entre las guías de onda de salida lo más cercano posible a 90°.
- Se repite el punto anterior para diferentes anchos hasta encontrar el ancho que da un buen compromiso entre pérdidas de inserción, desbalanceo y error de desfase.
- Se diseñan los adaptadores modales entre las guías de onda convencionales de las guías de onda de entrada/salida y las guías de onda periódicas de acceso de entrada al MMI.
- Se simulan los adaptadores modales entrada y salida en cascada (en configuración *back-to-back*) y se comprueba su correcto funcionamiento calculando sus parámetros S en el rango de longitudes de onda de interés.
- Se incorporan los adaptadores modales a la entrada y salida del MMI y se comprueba por simulación fotónica que el funcionamiento de todo el dispositivo es el esperado.

El utilizar guías de onda periódicas como las del primer objeto de invención como parte central del MMI permite conseguir un dispositivo de enorme ancho de banda, similar al que consiguen los MMI basados en guías de onda SWG convencionales, pero con un periodo Λ_z mayor.

El cuarto aspecto de la invención es un divisor de polarización que emplea las propiedades de las guías de onda periódicas sub-longitud de onda enladrilladas, para conseguir un divisor de polarización compacto, de gran ancho de banda, con bajas pérdidas, buen rechazo entre polarizaciones, fabricable en un único paso de grabado y con un MFS compatible con la técnica de fabricación en masa *Deep-UV*. El divisor de polarización se basa en un acoplador de interferencia multimodal (MMI) en cuya parte central se emplea una guía ancha multimodo del tipo de las descritas en el primer objeto de invención (guía de onda periódica).

El divisor de polarización, preferentemente implementado en SOI, comprende al menos una guía de onda de entrada que recibe un modo transversal eléctrico (TE) y un modo transversal magnético (TM), y dos guías de onda de salida que transmiten por separado dichos modos. Todas las guías de onda de entrada y salida al divisor de polarización están formadas por guías de onda convencionales.

La parte central del divisor de polarización es una guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, lo suficientemente ancha para soportar varios modos Floquet. El acceso a la guía de onda periódica central se produce por una o dos guías de entrada, formados por guías de

onda periódicas. Entre éstas y las guías de onda de entrada y salida al divisor de polarización se disponen sendos adaptadores modales.

Controlando las propiedades anisotrópicas de las estructuras de las guías de onda periódicas a través del desplazamiento ' d_z ' se consigue generar una autoimagen Talbot directa del modo transversal eléctrico (TE) a una primera distancia (L_{TE}) correspondiente a un múltiplo par de tres veces de una longitud de batido de dicho modo TE ($L_{\pi TE}$); y una autoimagen Talbot inversa del modo transversal magnético (TM) a una segunda distancia (L_{TM}), correspondiente a un múltiplo impar de tres veces de una longitud de batido de dicho modo TM ($L_{\pi TM}$).

Nótese que se entiende por autoimagen Talbot directa aquella posición en la que los modos propagados por la región de interferencia multimodal interfieren constructivamente en un máximo alineado con la guía de onda de entrada. De manera equivalente, en la autoimagen Talbot inversa, la interferencia multimodal resulta en un máximo que está desplazado transversalmente respecto a la guía de onda de entrada.

Seleccionando los parámetros geométricos de la estructura de la guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada mediante optimización por simulación fotónica, se establece que el cociente entre la longitud de batido del modo TM ($L_{\pi TM}$) y la longitud de batido del modo TE ($L_{\pi TE}$) sea un cociente de enteros par e impar, respectivamente. Preferentemente, para tener una longitud de dispositivo lo mas pequeña posible, que una sea el doble que la otra. Con el fin de optimizar la focalización de las autoimágenes de los modos TE y TM en la primera guía de onda de salida (imagen directa) y la segunda guía de onda de salida (imagen inversa) respectivamente, la longitud total del MMI es tres veces mayor que $L_{\pi TM}$ y seis que $L_{\pi TE}$.

Nótese que el control de la anisotropía que proporciona el desplazamiento longitudinal ' d_z ' o efecto 'ladrillo' ('*bricked*' en inglés), aumenta el grado de libertad a la hora de seleccionar el factor de proporcionalidad entre las distancias de focalización de las autoimágenes de los modos TE y TM, resultando en un divisor de polarización más compacto y de menores pérdidas que aquellos MMI en los que no existe dicha posibilidad, como los MMI hechos con guías homogéneas convencionales.

Así mismo, nótese que, si bien otros parámetros de las guías de onda SWG como el periodo o el ciclo de trabajo pueden afectar a la anisotropía resultante, dicho efecto es significativamente menor que el producido por el efecto 'ladrillo', limitando por tanto las prestaciones obtenibles por el divisor de polarización.

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 siguientes figuras, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo:

Figura 1.- Muestra una vista en perspectiva de una guía de onda convencional del estado de la técnica.

Figura 2.- Muestra una vista en perspectiva de una guía de onda SWG convencional del estado de la técnica.

Figura 3.- Muestra una gráfica donde se representa la variación del índice efectivo de un modo Floquet en una guía de onda SWG convencional en función del cociente entre la longitud de onda y el periodo de repetición, así como las tres zonas posibles de funcionamiento.

Figura 4.- Muestra cómo se ve modificada la curva del índice efectivo de un modo Floquet en una guía de onda SWG convencional en función de la longitud de onda cuando se disminuye el ciclo de trabajo.

Figura 5.- Muestra cómo se ve modificada la curva del índice efectivo de un modo Floquet en una guía de onda SWG convencional en función de la longitud de onda cuando se disminuye el periodo de repetición.

Figura 6.- Muestra esquemáticamente, una guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

Figura 7.- Muestra esquemáticamente, en una vista superior, una guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

Figura 8.- Muestra una gráfica en la que se muestra el índice efectivo del modo Floquet transversal eléctrico de orden cero (TE_0) en función de la longitud de onda de una guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, para distintos valores del periodo (Λ_z) y con un desplazamiento longitudinal (d_z) igual a cero, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

Figura 9.- Muestra una gráfica en la que se muestra el índice efectivo del modo Floquet transversal eléctrico de orden cero (TE_0) en función de la longitud de onda de una guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, para distintos valores del desplazamiento longitudinal (d_z), de acuerdo con una realización preferente de la invención.

5

Figura 10.- Muestra una gráfica en la que se muestra el índice efectivo del modo Floquet transversal magnético de orden cero (TM_0) en función de la longitud de onda de una guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, para distintos valores del desplazamiento longitudinal (d_z), de acuerdo con una realización preferente de la invención.

10

Figura 11.- Muestra un adaptador modal entre una guía de onda convencional y una guía periódica sub-longitud de onda enladrillada, y viceversa, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

15

Figura 12.- Muestra un acoplador de interferencia multimodal basado en guías de onda periódicas sub-longitud de onda enladrillada funcionando como divisor de potencia 3dB/90°, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

20

Figura 13.- Muestra una gráfica en la que se muestra la longitud de batido en función de la longitud de onda de los dos primeros modos Floquet transversales eléctricos (TE_0 y TE_1) de una guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, para distintos valores del desplazamiento longitudinal (d_z), de acuerdo con una realización preferente de la invención.

25

Figura 14.- Muestra una gráfica en la que se muestran las prestaciones (pérdidas de inserción y desbalanceo) del divisor de potencia 3dB/90° realizado con guías de onda periódicas sub-longitud de onda enladrillada, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

30

Figura 15.- Muestra un acoplador de interferencia multimodal basado en guías periódicas sub-longitud de onda enladrilladas funcionando como divisor de polarización, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

35

A continuación se describe, con ayuda de las figuras 1 a 15, una realización preferente de la presente invención.

La figura 6 muestra de manera esquemática una vista en perspectiva de una realización preferente de una guía de onda periódica (600) sub-longitud de onda enladrillada, preferentemente monomodo, que permite conservar todas las propiedades de control que tienen las guías de onda SWG (200) convencionales (control del índice efectivo, de su dispersión, y de su birrefringencia), como la mostrada en la figura 2, pero trabajando con unos periodos (Λ_z) en la dirección de propagación que pueden ser mayores, y por tanto, más factibles de fabricar. La figura 6 muestra los parámetros geométricos principales de la guía de onda periódica (600) objeto de la invención.

La guía de onda periódica (600) sub-longitud de onda enladrillada comprende un sustrato (603), sobre el que se disponen una serie de bloques (601, 602) distribuidos periódicamente en una dirección perpendicular a la de propagación de onda que entra por la guía de onda periódica (600). Esta dirección transversal está representada como dirección x en la figura 6.

La guía de onda periódica (600) sub-longitud de onda enladrillada está formada por una estructura que presenta dos tipos de periodicidades, una en la dirección transversal (x) y otra en la dirección longitudinal (z) o de propagación.

La periodicidad en la dirección transversal, indicada como ' Λ_x ' en la figura 6, se obtiene combinando bloques (601, 602) de material de núcleo que tienen la misma longitud ' a_z ', pero diferente ancho, ' a_x ' y ' b_x ', unos primeros bloques (601) de ancho ' a_x ' y unos segundos bloques (602) de ancho ' b_x '.

Los bloques (601 y 602) pueden tener un desplazamiento relativo entre ellos en dirección longitudinal ' d_z ', que es lo que les confiere unas propiedades diferentes de las que tienen las guías de onda SWG (200) convencionales con desplazamiento relativo entre ellos igual a cero ($d_z=0$).

La periodicidad en la dirección de propagación ' Λ_z ' se consigue alternando los bloques (601, 602) de longitud ' a_z ' con unos huecos (604) de material de cubierta de longitud ' b_z '. Las secciones de los bloques (601 y 602) de material de núcleo de la guía de onda periódica (600) tienen un ancho ' W ' y una altura ' H ' y están apoyadas sobre el material de soporte o sustrato (603) que actúa como aislante.

El periodo en dirección longitudinal ' Λ_z ' debe cumplir la condición de no estar en Bragg, es decir, $\Lambda_z < \lambda/(2 \cdot n_{\text{eff}})$. Dado que hay dos periodos (Λ_z y Λ_x) se suelen definir dos ciclos de trabajo.

El primero DC_z para definir la proporción de cada bloque (601, 602) de silicio 'a_z' con relación al periodo longitudinal Λ_z . El segundo DC_x para definir la proporción de cada bloque (601, 602) de silicio que no se desplaza 'a_x' en relación con el periodo transversal Λ_x .

- 5 Los valores particulares de todos los parámetros geométricos se definen previamente a la fabricación de la guía de onda periódica (600) mediante simulaciones numéricas de acuerdo con lo descrito anteriormente.

En particular, la guía de onda periódica (600) se modela preferentemente como una guía
10 equivalente con un núcleo cuyo índice de refracción es un tensor diagonal ($\tilde{n}$) de acuerdo con la siguiente expresión:

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

donde:

$$\tilde{n}_{xx}(d_z) = \frac{1}{2} (n_{xx} + \sqrt{n_{xx} \cdot n_{zz}}) + \frac{1}{2} (n_{xx} - \sqrt{n_{xx} \cdot n_{zz}}) \cdot \cos\left(2\pi \frac{d_z}{\Lambda_z}\right)$$

15

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

$$\tilde{n}_{zz}(d_z) = \frac{n_{xx} \cdot n_{zz}}{\tilde{n}_{xx}(d_z)}$$

20

siendo $[n_{xx}, n_{yy}, n_{zz}]$ las componentes de un tensor diagonal (n) del medio anisotrópico homogéneo equivalente de una estructura SWG (200) convencional, es decir, sin desplazamiento relativo de bloques en dirección longitudinal ($d_z=0$). Este modelado puede proporcionar un valor final de desplazamiento (d_z), o bien servir como una primera aproximación, refinada posteriormente en una segunda etapa de cálculo mediante una simulación completa de la estructura (es decir, sin aproximaciones de estructuras SWG como medios homogéneos).

25

Alternativamente, una realización alternativa de la invención, el periodo 'Λ_z' cumple que $\Lambda_z \geq \lambda/(2 \cdot n_{\text{eff}})$, siendo λ la longitud de onda de la onda que se propaga por la guía de onda periódica (600) y n_{eff} el índice efectivo del modo. Por lo tanto, la guía de onda periódica (600) operaría en un régimen distinto al sub-longitud de onda, es decir, operando en modo radiación o en modo reflector distribuido.

30

La figura 7 muestra de manera esquemática, pero ahora con una vista superior, una realización preferente de una guía de onda periódica (600) sub-longitud de onda enladrillada, preferentemente monomodo.

Para ilustrar la potencialidad de la invención, en la figura 8 se muestra primero cómo se ve modificado el índice efectivo del modo Floquet fundamental con polarización TE de una guía de onda SWG (200) convencional cuando el periodo Λ_z se incrementa. En dicha realización preferente se han usado los materiales siguientes: los bloques (601, 602) de material de núcleo de silicio, el sustrato (603) de dióxido de silicio, y el material cubierta (604), posicionado entre los bloques (601, 602), de dióxido de silicio. Los índices de refracción a la longitud de onda de espacio libre de $1.55 \mu\text{m}$ son: $n_{\text{Si}}=3.476$ y $n_{\text{SiO}_2}=1.444$. Por su parte, el ancho W y el grosor H fueron $3.3 \mu\text{m}$ y $0.22 \mu\text{m}$, respectivamente.

Como se puede observar en la figura 8, al aumentar el tamaño del periodo, las curvas de índice efectivo se desplazan hacia índices efectivos mayores y al mismo tiempo aumentan su pendiente negativa.

En la figura 9, se demuestra cómo la introducción de cierto desplazamiento ' d_z ' al caso de periodos Λ_z grandes permite recomponer la situación inicial que se tenía con periodos Λ_z pequeños, es decir, el índice efectivo del modo Floquet TE_0 vuelve a disminuir de valor y su dependencia con la longitud de onda vuelve a hacerse más plana.

En la figura 10, por su parte, se muestra cómo varía el índice efectivo del modo Floquet TM_0 para diversos valores del desplazamiento ' d_z '. Se observa cómo ahora el índice efectivo del modo TM_0 apenas se ve afectado.

En la figura 11 se muestra una realización preferente de un adaptador modal (1100) correspondiente al segundo aspecto de la invención. El objetivo del adaptador modal (1100) o transición es minimizar las pérdidas de inserción entre guías de onda convencionales (100) y guías de onda periódicas (600) de aspecto enladrillado, que formen parte de un dispositivo que haga uso de las mismas. Los adaptadores modales (1100) deben funcionar correctamente para las dos polarizaciones TE y TM. En la figura 6 se han representado los bloques (601, 602) en dos colores diferentes, para mayor comprensión de la figura, pero hay que destacar que son bloques (601, 602) del mismo material. Lo mismo ocurre con los bloques (601, 602) representados en las figuras 12 y 15.

El adaptador modal (1100) comprenden dos zonas. Una primera zona (1101), para convertir una guía de onda convencional (100) de cierto ancho en otra guía de onda SWG (200) del mismo ancho y con un periodo en dirección longitudinal igual al periodo final deseado ' Λ_z '. Para ello, el puente central (1103) entre las barras (201) de material núcleo va disminuyendo

su ancho de manera progresiva hasta desaparecer. Una segunda zona (1102), sirve para convertir la guía de onda SWG (200) que resulta de la primera zona en la guía de onda periódica (600) de aspecto enladrillado deseada.

5 En la segunda zona (1102), el desplazamiento ' d_z ' es variado desde un valor inicial igual a cero hasta el valor final deseado. En la segunda zona (1102), al tiempo que se incrementa el desplazamiento ' d_z ', el ancho de la guía es también incrementado de manera gradual hasta conseguir el valor de ancho deseado. La razón de hacer en la primera zona (1102) sólo el cambio de guía de onda convencional (100) homogénea a guía de onda SWG (200) del mismo
10 ancho, y no incluir en la primera zona el cambio también entre anchos deseados, es porque la guía de onda convencional (100) podría entrar en la zona Bragg en la primera zona.

Si el incremento en ancho se hace al mismo tiempo que el desplazamiento ' d_z ', evitamos ese peligro pues a medida que alejamos el Bragg se puede ir incrementando el ancho. Nótese
15 que la geometría específica del adaptador modal (1100) puede variar siempre que se garantice una transición modal progresiva, suave, y se evite entrar en Bragg, pues aumentarían mucho las pérdidas por reflexión.

En la figura 12 se muestra una realización preferente de un divisor de potencia (1200) 3dB
20 /90° correspondiente al tercer aspecto de la invención. Comprende dos guías de entrada (1201 y 1202) y dos guías de salida (1203 y 1204), todas ellas guías de onda convencionales (100), que se conectan a un dispositivo de interferencia multimodal (1206) a través de sendos adaptadores modales (1100), como los de la figura 11. Los adaptadores modales (1100) comprenden una guía ancha del tipo guía de onda periódica (600) sub-longitud de onda
25 enladrillada.

Situado entre ambos adaptadores modales (1100), de salida y de entrada, se dispone el dispositivo de interferencia modal (1206) que comprende una guía de onda periódica (600) central con ancho W_{MMI} y longitud L_{MMI} . Los adaptadores modales (1100), que se disponen
30 entre las guías de onda de entrada (1201 y 1202) y la guía de onda periódica (600), y entre ésta y las guías de onda de salida (1203 y 1204), son como los descritos en el segundo aspecto de invención, y transforman los perfiles de campo de las guías de onda de entrada/salida (1201, 1202, 1203, 1204) a los perfiles de campo de la guía de onda periódica (600) del MMI.

35 En comparación con un MMI 2x2 realizado exclusivamente con guías de onda convencionales

(100), el divisor de potencia (1200) descrito consigue lograr un tamaño más reducido y compacto, e incrementar considerablemente el ancho de banda. Comparado con un MMI realizado con guías de onda SWG convencionales (200), el divisor de potencia (1200) logra las mismas características de funcionamiento (pérdidas de inserción, desbalanceo y error de fase en un gran ancho de banda) pero con un mínimo tamaño de rasgo (MFS) considerablemente mayor, del orden de un 50 % mayor.

Fijando en primer lugar el grosor de los bloques (601, 602) de material de núcleo de silicio a $H = 220\text{nm}$, se determinan por simulación fotónica, el ancho (W_a) y separación (W_s) de las guías de onda periódicas (600) de acceso a la parte central del divisor de potencia (1200), es decir, al MMI (1206). Se decidió elegir los valores de $W_a = 1200\text{ nm}$ y $W_s = 800\text{ nm}$. A continuación, se elige un primer ancho de la guía de onda periódica (600) central (W_{MMI}) del MMI, aproximadamente igual a dos veces la suma de los anchos de las guías de onda periódicas de acceso (1205) a la parte central de acceso (W_a) y la distancia de separación entre ellas (W_s), es decir $W_{\text{MMI}} = 2(W_a + W_s)$.

El siguiente paso es determinar, haciendo uso de simulaciones fotónicas, el periodo (Λ_z) y el desplazamiento (d_z) que maximizan el MFS y al mismo tiempo logran una longitud de batido de los dos primeros modos del MMI (1206) los más plana posible en el rango de longitudes de onda de interés. Para un ciclo de trabajo del 50 % ($a_z = b_z$), en la figura 13 se muestra un ejemplo de cómo varía con la longitud de onda la longitud de batido de los dos primeros modos (el TE_0 y el TE_1) para diversos valores de desplazamiento ' d_z ' y con un periodo longitudinal ' $\Lambda_z = 250\text{ nm}$ '.

El periodo transversal ' Λ_x ' se eligió por simplicidad igual al longitudinal ' Λ_z '. Nótese que el caso de desplazamiento igual a cero ($d_z = 0$) se corresponde con el caso de guía de onda SWG convencional (200). Como se puede observar en las curvas, el caso de desplazamiento igual a cero ($d_z = 0$) presenta un mal comportamiento en el rango de longitudes de onda más pequeñas, como consecuencia de estar muy cerca del Bragg.

Para poder conseguir un comportamiento plano en longitud de onda para el caso de desplazamiento cero, es necesario usar periodos longitudinales significativamente menores (' $\Lambda_z = 190\text{ nm}$ '), tal y como se muestra también en la fig. 13. Para poder usar periodos mayores como el indicado de 250 nm , es necesario ir aumentando progresivamente el desplazamiento ' d_z '. Con ello se consigue ir aplanando las curvas y seleccionar aquella combinación de valores que da el resultado deseado en el rango de longitudes de onda de interés.

Una vez que se ha fijado el periodo longitudinal ' Λ_z ' y desplazamiento ' d_z ' con el que va a operar el divisor de potencia (1200), se pueden determinar por sucesivas simulaciones fotónicas el resto de parámetros, así como realizar pequeños reajustes de los ya prefijados.

La figura 14 muestra la respuesta en longitud de onda que se obtiene en simulación de la realización preferente del divisor de potencia (1200) 3dB/90°, correspondiente al tercer aspecto de la invención. En concreto, se representan dos figuras de mérito, las pérdidas de inserción, definidas como el cociente entre la potencia que aparece en las guías de salida (1203 y 1204) en el modo fundamental TE_0 , respecto de la potencia que entra la guía de entrada (1201); y el desbalanceo, definido como el cociente entre las potencias que aparecen en las guías de salida (1203 y 1204). Como se puede observar en dicha figura, el divisor de potencia (1200) diseñado logra unas pérdidas de inserción y un desbalanceo inferiores a 1 dB en un ancho de banda cercano a los 400 nm.

En la figura 15 se muestra una realización preferente de un divisor de polarización (1500) correspondiente al cuarto aspecto de la invención. Para esta aplicación se entra por una guía de entrada (1501) con los modos fundamentales de las dos polarizaciones TE_0 y TM_0 . El separador de polarización (1500) se diseña para separar ambas polarizaciones y conseguir que aparezca la polarización TE_0 en una primera guía de salida (1502) y la polarización TM_0 en una segunda guía de salida (1503), con las mínimas pérdidas posibles y maximizando el ancho de banda de funcionamiento.

Para esta aplicación la guía de onda periódica (600) se diseña mediante optimización por simulación fotónica para que la longitud de batido del modo TM ($L_{\pi_{TM}}$) sea un número entero de veces mayor que la longitud de batido del modo TE ($L_{\pi_{TE}}$), preferentemente el doble. Con el fin de optimizar la focalización de las autoimágenes de los modos TE y TM en la primera guía de onda de salida (1502) y la segunda guía de onda de salida (1503) respectivamente, la longitud total del acoplador de interferencia multimodo es tres veces mayor que $L_{\pi_{TM}}$ y seis que $L_{\pi_{TE}}$. Entre la guía de onda de entrada (1501) y la guía de onda periódica (600), se deben usar adaptadores modales (1100) para facilitar la transición.

Las realizaciones preferentes del tercer y cuarto aspecto de la invención que se han descrito hacen uso de un MMI (1206, 1504) en una configuración 2x2. No obstante, caben otras configuraciones, tales como 1x2, 1x4, 2x3, 3x3 ó 2x4, presentando todas ellas en la zona central una guía de onda periódica (600) sub-longitud de onda de aspecto enladrillado. Las dimensiones en cada caso dependerán de la aplicación para la que estén pensadas.

Nótese que las realizaciones preferentes del dispositivo, tanto la guía de onda periódica (600) de aspecto enladrillado, primer objeto de invención y de los sistemas asociados que hacen uso del mismo (divisor de potencia (1200) 3dB/90° y divisor de polarización (1500) basados en dicha guía de onda periódica (600)) se implementan 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 utilizadas en las distintas realizaciones, ya sean guías de onda convencionales (100) o guías de onda periódicas (600) se realizan preferentemente mediante un núcleo de silicio, depositado sobre una capa aislante como, por ejemplo, dióxido de silicio. El material cubierta (604) 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.

En cuanto a la fabricación de los dispositivos propuestos, nótese que las guías de onda periódicas (600) sub-longitud de onda de aspecto enladrillado, independientemente del desplazamiento ' d_z ', no incrementan la dificultad ni el número de pasos respecto a la fabricación de guías de onda convencionales (100). Es decir, todas las estructuras utilizadas por el divisor de potencia (1200) 3dB/90° y el divisor de polarización (1500) objetos 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 ultravioleta profundo ('*deep-UV*' en inglés)

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, sin salir del objeto de la invención tal y como ha sido reivindicada.

REIVINDICACIONES

1.- Guía de onda periódica (600) sub-longitud de onda enladrillada, preferentemente monomodo, por la que se propaga una onda en una dirección de propagación, caracterizada por que comprende un sustrato (603) sobre el que se posicionan una pluralidad de bloques (601, 602) de un material núcleo dispuestos de manera periódica con un periodo ' Λ_z ' en la dirección de propagación, y un material de cobertura (604), posicionado entre y sobre la pluralidad de bloques (601, 602), distinguiéndose unos primeros bloques (601) de ancho ' a_x ' y unos segundos bloques (602) de ancho ' b_x ', alternados sobre el sustrato (603) perpendicularmente a la dirección de propagación según un periodo ' Λ_x ', y estando los segundos bloques (602) desplazados una distancia ' d_z ' en la dirección de propagación respecto de los primeros bloques (601).

2.- La guía de onda periódica (600) de la reivindicación 1, en la que el periodo ' Λ_z ' cumple que:

$$\Lambda_z < \lambda / (2 \cdot n_{\text{eff}})$$

siendo λ la longitud de onda de la onda que se propaga por la guía de onda periódica (600) y n_{eff} el índice efectivo del modo.

3.- La guía de onda periódica (600) de la reivindicación 1, en la que el periodo ' Λ_z ' cumple que:

$$\Lambda_z \geq \lambda / (2 \cdot n_{\text{eff}})$$

siendo λ la longitud de onda de la onda que se propaga por la guía de onda periódica (600) y n_{eff} el índice efectivo del modo.

4.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con la reivindicación 1, en la que el desplazamiento ' d_z ' de los segundos bloques (602) de ancho ' b_x ' 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).

5.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con la reivindicación 1, en la que el desplazamiento ' d_z ' de los segundos bloques (602) de ancho ' b_x ' 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

(TM₀).

6.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la guía de onda periódica (600) es de una anchura (W) variable.

7.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que los periodos (Λ_z y Λ_x) según los que se disponen los bloques (601, 602) son variables en la dirección de propagación y en la dirección perpendicular a la de propagación.

8.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la distancia (d_z) es variable en la dirección de propagación.

9.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el material de cobertura (604) y la pluralidad de bloques (601, 602) de material de núcleo presentan propiedades geométricas constantes a lo largo de la longitud de la guía de onda (600).

10.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 en la que el material de cobertura (604) y la pluralidad de bloques (601, 602) de material de núcleo presentan propiedades geométricas variables a lo largo de la longitud de la guía de onda (600).

11.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que los bloques (601, 602) son de silicio y el sustrato (603) es un material aislante, preferentemente dióxido de silicio, en una configuración de silicio sobre aislante (SOI).

12.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el material de cobertura (604) es un material seleccionado entre dióxido de silicio, polímero y aire.

13.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que los bloques (601, 602) son de silicio y el material cubierta (604) es un polímero que presenta una variación del índice de refracción con la temperatura de signo opuesto a la variación del índice de refracción del silicio.

14.- La guía de onda periódica (600) de acuerdo con la reivindicación 13, en la que la proporción de material de cobertura (604) respecto al material de los bloques (601,602) dentro de un periodo ' Λ_z ' 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}).

5

15.- La guía de onda periódica (600) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que su tensor diagonal ($\tilde{n}$) viene dado por una expresión de la forma:

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

donde:

$$\begin{aligned} \tilde{n}_{xx}(d_z) &= \frac{1}{2} (n_{xx} + \sqrt{n_{xx} \cdot n_{zz}}) + \frac{1}{2} (n_{xx} - \sqrt{n_{xx} \cdot n_{zz}}) \cdot \cos \left(2\pi \frac{d_z}{\Lambda_z} \right) \\ \tilde{n}_{yy} &= n_{yy} \\ \tilde{n}_{zz}(d_z) &= \frac{n_{xx} \cdot n_{zz}}{\tilde{n}_{xx}(d_z)} \end{aligned}$$

10

siendo $[n_{xx}, n_{yy}, n_{zz}]$ las componentes de un tensor diagonal (n) del medio anisotrópico homogéneo equivalente de una estructura SWG (200) (*Sub Wave Length*, Sub-Longitud de Onda).

15

16.- Adaptador modal (1100) para modo transversal eléctrico (TE) y modo transversal magnético (TM) de onda, que hace uso de la guía de onda periódica (600) de cualquiera de las reivindicaciones 1-15, caracterizado por que comprende:

20

- una primera zona (1101) de conversión de una guía de onda convencional (100) a una guía de onda SWG (200) del mismo ancho que la guía de onda convencional (100) y con un periodo en dirección longitudinal ' Λ_z ', en el que la guía de onda (SWG) comprende unas barras (201) de material núcleo alternadas con un puente central (1103) de material núcleo, posicionadas las barras (201) y el puente central (1103) sobre un sustrato (202), y en el que el puente central (1103) va disminuyendo su ancho de manera progresiva hasta desaparecer,

25

- una segunda zona (1102) de conversión de la guía de onda SWG (200) que resulta de la primera zona (1101) en la guía de onda periódica (600) de la reivindicación 1, en la que el desplazamiento ' d_z ' de los segundos bloques (602) varía desde un valor inicial igual a cero hasta un valor final.

30

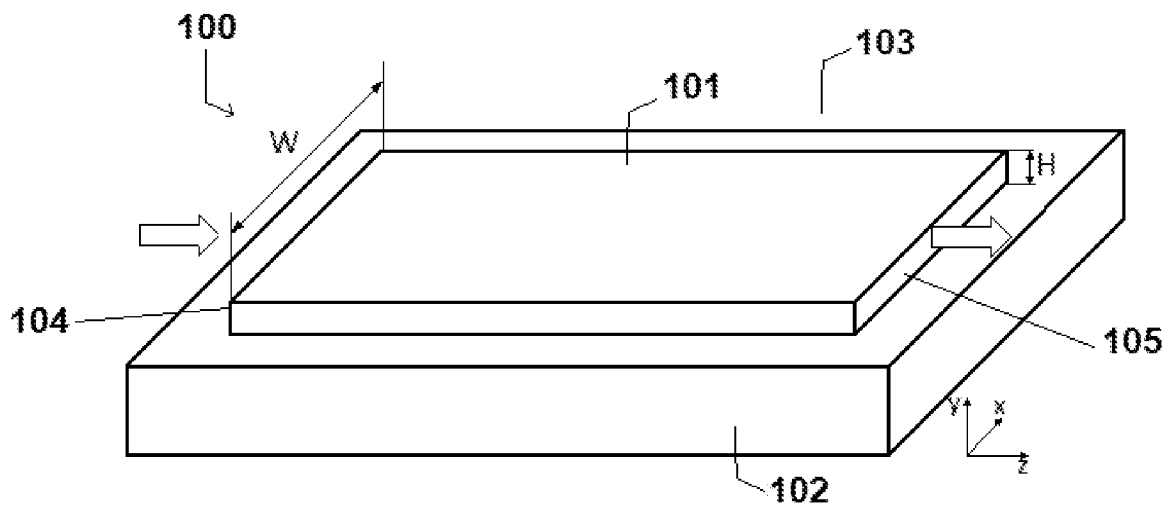
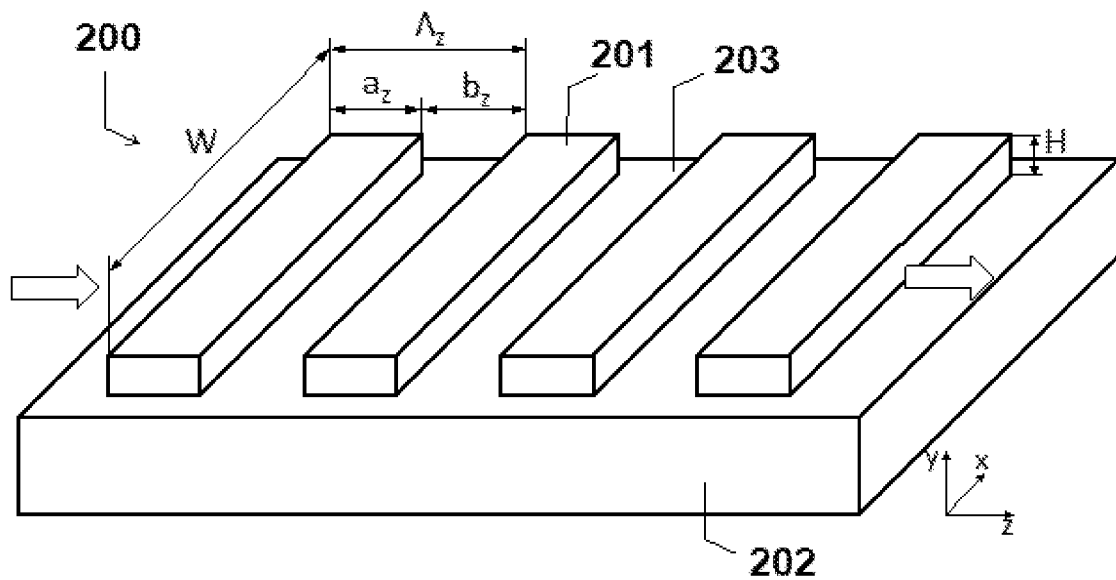
17.- El adaptador modal (1100) de la reivindicación 16, en el que el ancho de la guía de onda periódica (600) incrementa de manera gradual hasta un valor de ancho final.

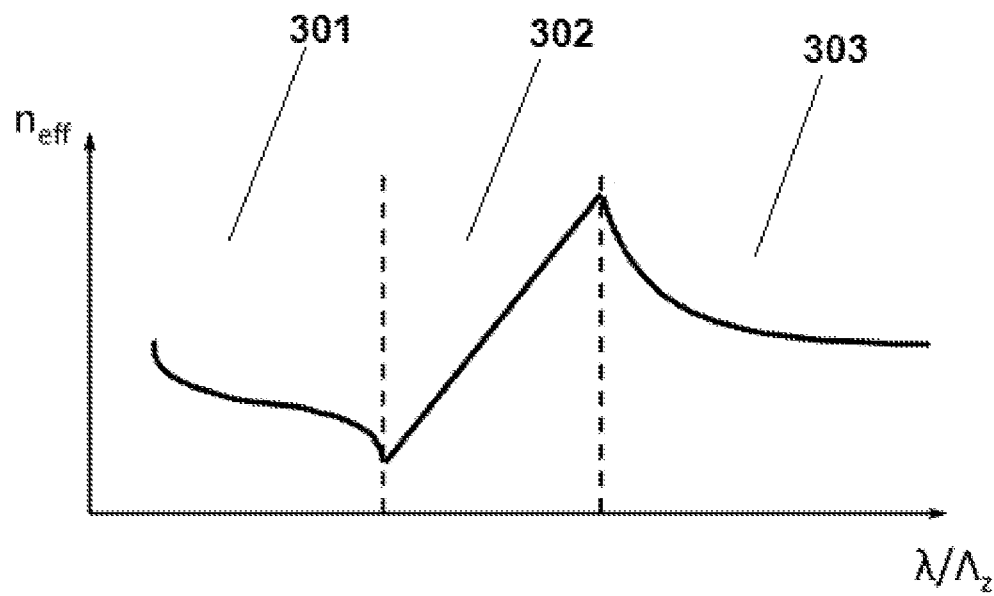
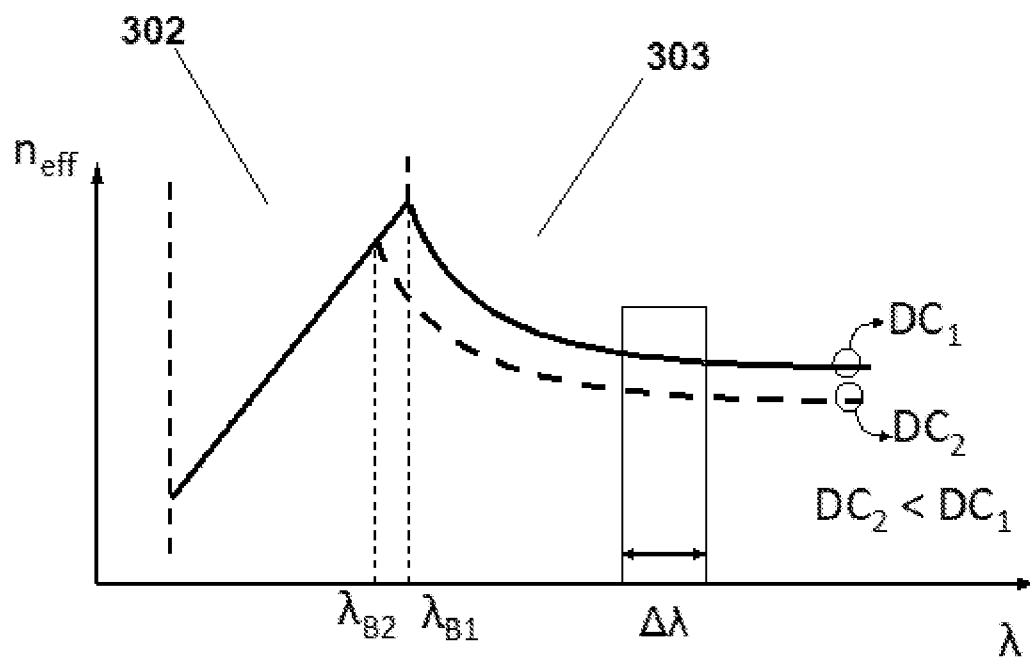
18.- Divisor de potencia (1200), caracterizado por que comprende:

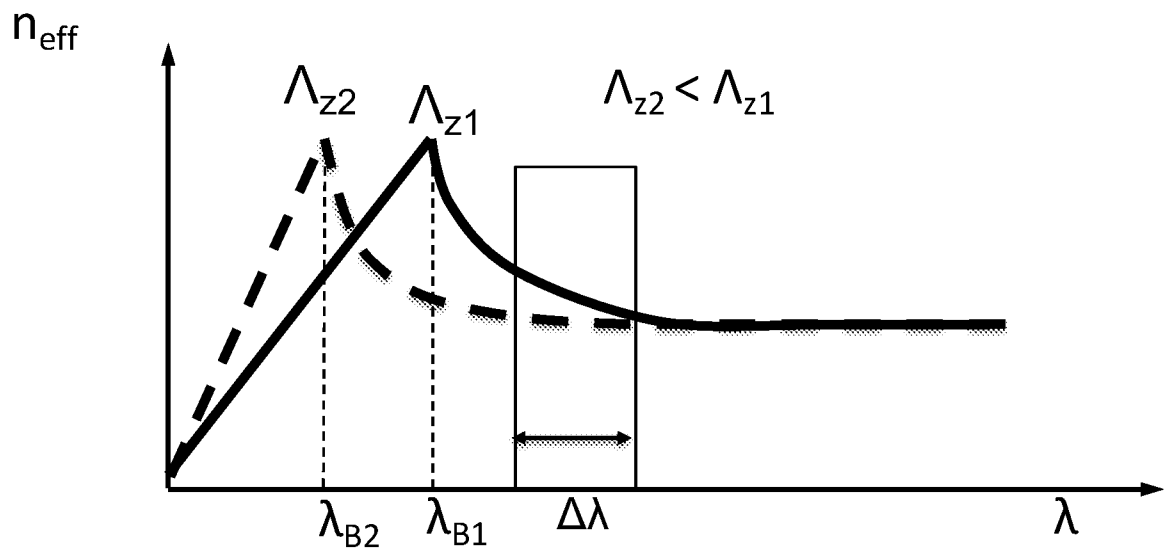
- al menos una guía de onda de entrada (1201) que recibe un modo transversal eléctrico (TE) de onda,
- al menos una primera guía de onda de salida (1203) para el modo transversal eléctrico (TE) de salida, con una porción de potencia del modo transversal eléctrico (TE) de salida,
- al menos una segunda guía de onda de salida (1204) para el modo transversal eléctrico (TE) de entrada, con la porción restante de potencia del modo transversal eléctrico (TE) de salida, desfasada una cierta cantidad respecto del modo transversal eléctrico (TE) de salida de la al menos una primera guía de onda de salida (1203),
- un dispositivo de interferencia multimodal (1206) que comprende la guía de onda periódica (600) de la reivindicación 1 en su parte central,
- al menos un primer adaptador modal (1100), de la reivindicación 16, posicionado entre la al menos una guía de onda de entrada (1201) y el dispositivo de interferencia multimodal (1206), y
- al menos un segundo adaptador modal (1100), de la reivindicación 16, posicionado entre el dispositivo de interferencia multimodal (1206) y la al menos una guía de onda de salida (1203).

19.- Divisor de polarización (1500) de modo transversal eléctrico (TE) y modo transversal magnético (TM) de onda, caracterizado por que comprende:

- al menos una guía de onda de entrada (1501) que recibe modo transversal eléctrico (TE) y modo transversal magnético (TM) de onda,
- al menos una primera guía de salida (1502) para la polarización del modo transversal eléctrico (TE),
- al menos una segunda guía de salida (1503) para la polarización del modo transversal magnético (TM),
- un dispositivo de interferencia multimodal (1504) que comprende la guía de onda periódica (600) de la reivindicación 1 en su parte central,
- un primer adaptador modal (1100), de la reivindicación 16, posicionado entre la al menos una guía de onda de entrada (1501) y el dispositivo de interferencia multimodal (1504), y
- un segundo y tercer adaptador modal (1100) de la reivindicación 16, posicionados entre el dispositivo de interferencia multimodal (1504) y la al menos una primera guía de salida (1502) y la al menos una segunda guía de salida (1503).

FIGURAS**Fig. 1****Estado de la Técnica****Fig. 2****Estado de la Técnica**

**Fig. 3****Estado de la Técnica****Fig. 4****Estado de la Técnica**

**Fig. 5****Estado de la Técnica**

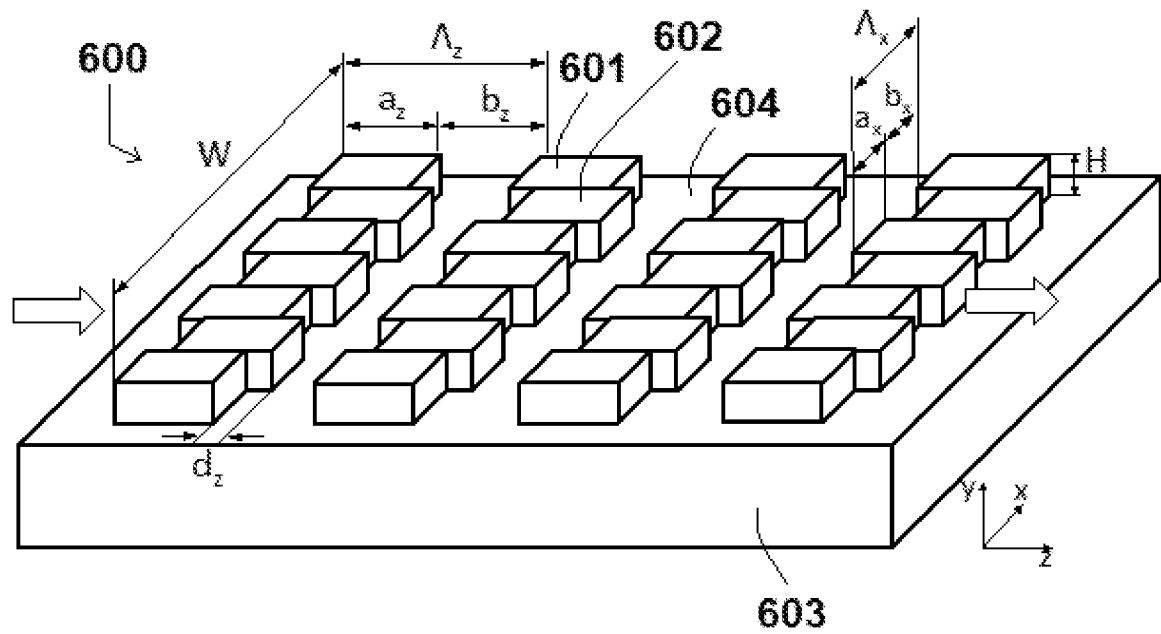


Fig. 6

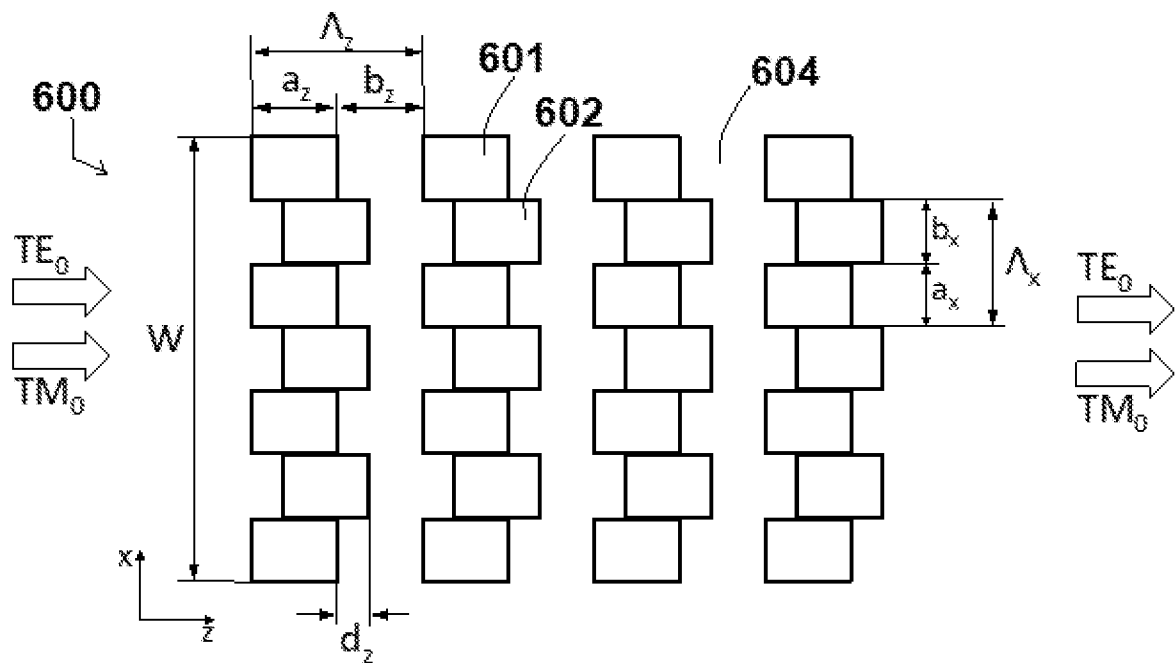
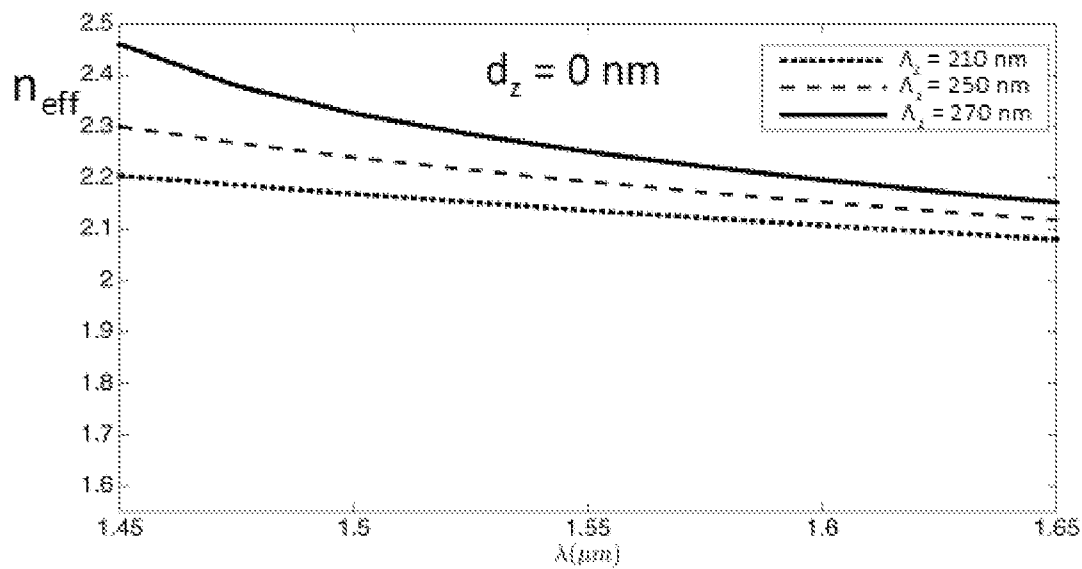
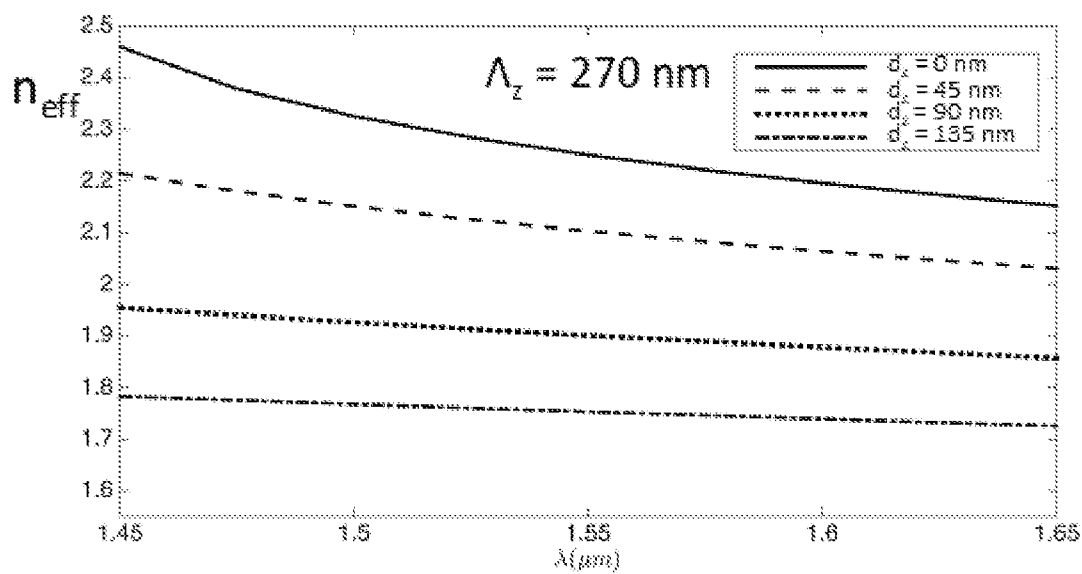


Fig. 7

**Fig. 8****Fig. 9**

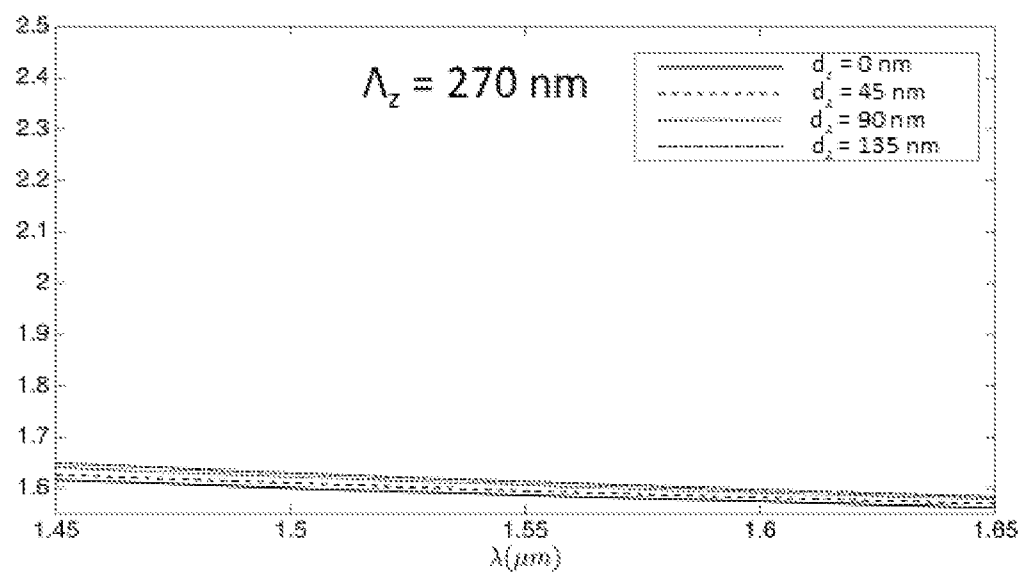


Fig. 10

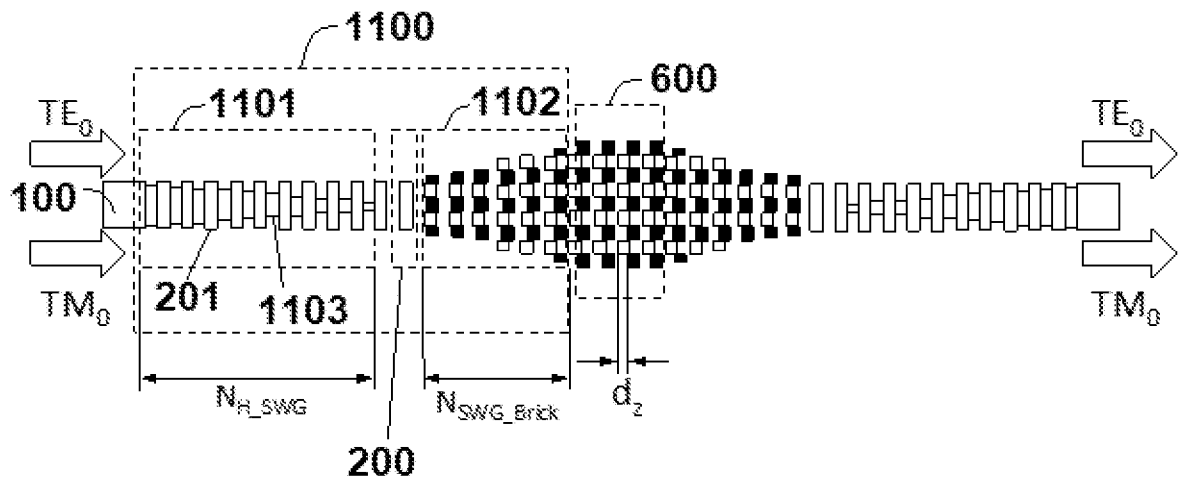


Fig. 11

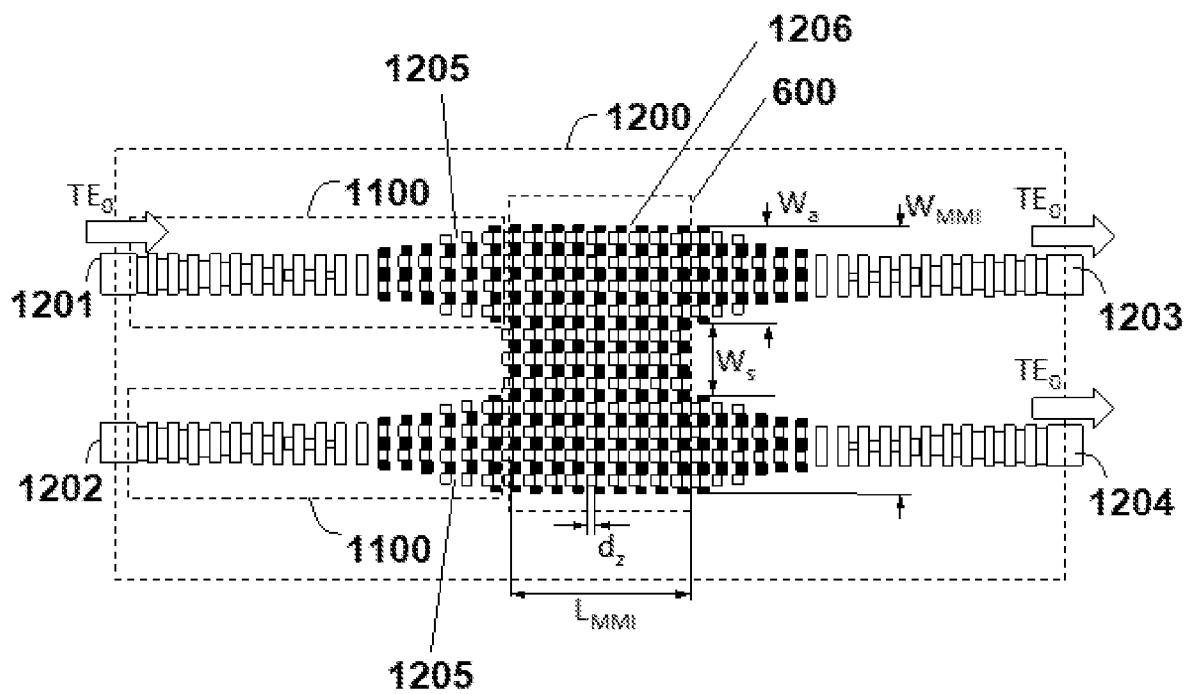
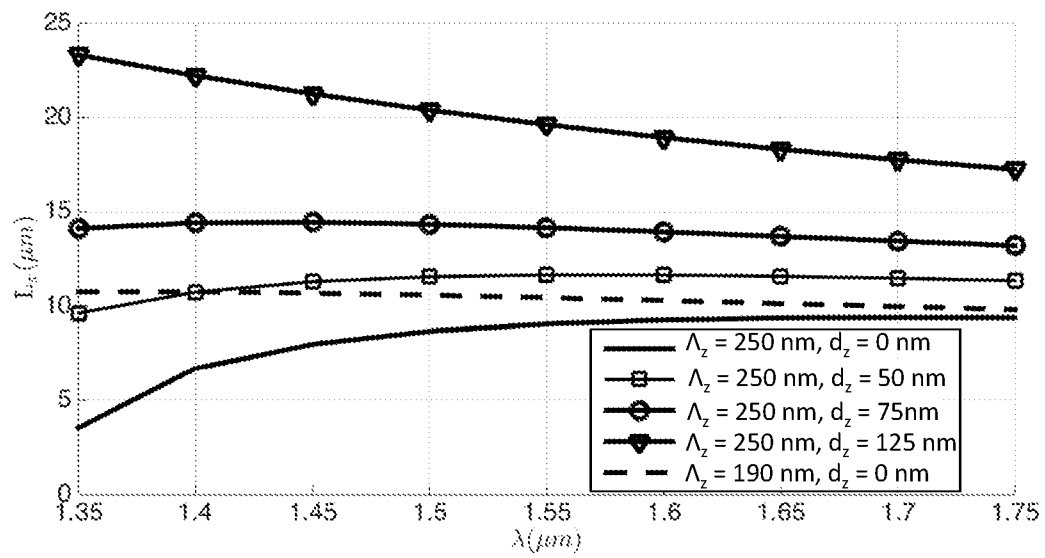


Fig. 12

**Fig. 13**

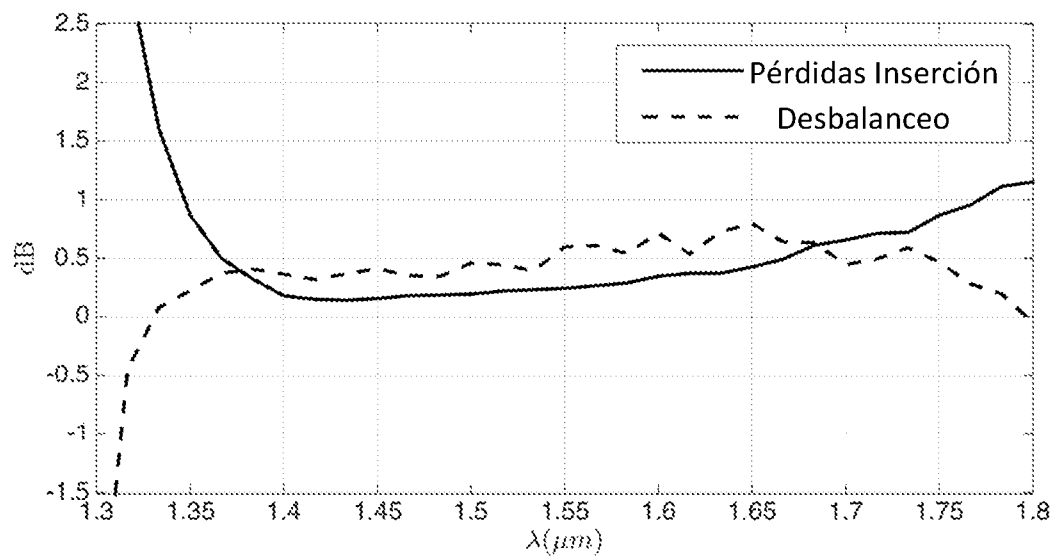


Fig. 14

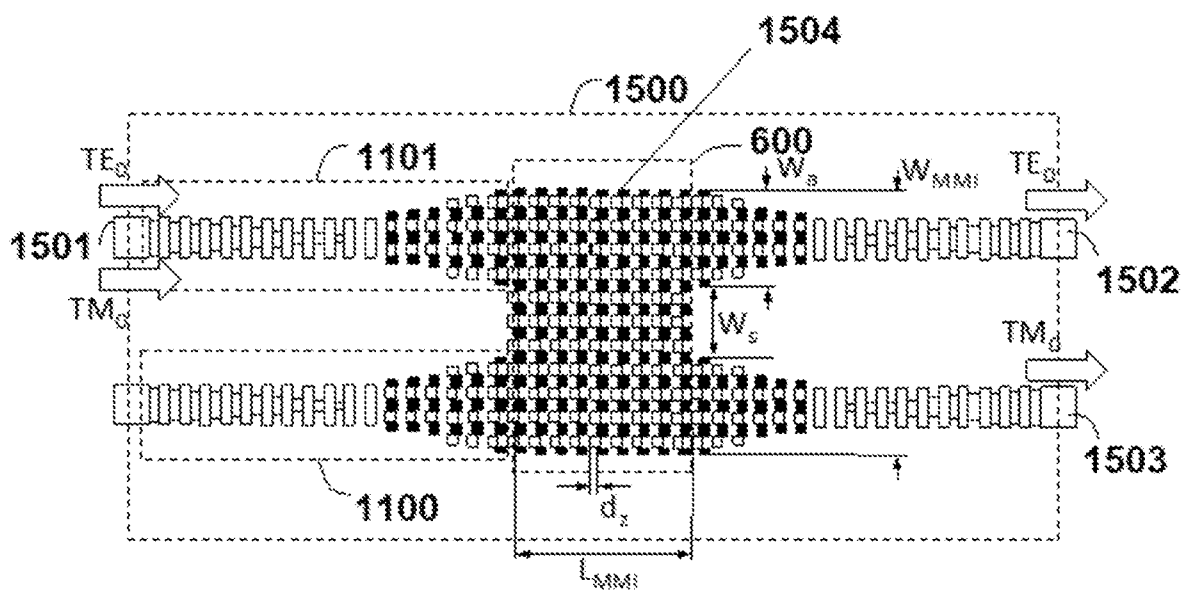


Fig. 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2021/070279

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See extra sheet

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	ZHOU WEN et al. Subwavelength Engineering in Silicon Photonic Devices. Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 20190501 IEEE Service Center, Piscataway, NJ, US., 01/05/2019, Vol. 25, N° 3, pages 1 - 13, ISSN 1077-260X, <DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2899757>	1-19
A	HASMAN E et al.. Polarization beam-splitters and optical switches based on space-variant computer-generated subwavelength quasi-periodic structures. Optics Communications, 20020801, Elsevier Amsterdam, NL, 01/08/2002, Vol. 209, N° 1-3, pages 45 - 54, ISSN 0030-4018, <DOI: 10.1016/S0030-4018(02)01598-5>	1-19

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.	
"E" earlier document but published on or after the international filing date	
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
21/06/2021

Date of mailing of the international search report
(24/06/2021)

Name and mailing address of the ISA/

Authorized officer
J. Botella Maldonado

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Facsimile No.: 91 349 53 04

Telephone No. 91 3495382

CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B5/18 (2006.01)

G02B5/30 (2006.01)

G02B6/24 (2006.01)

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

PCT/ES2021/070279

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

Ver Hoja Adicional

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

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

G02B

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

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

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

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
A	ZHOU WEN et al.. Subwavelength Engineering in Silicon Photonic Devices. Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 20190501 IEEE Service Center, Piscataway, NJ, US, 01/05/2019, Vol. 25, Nº 3, páginas 1 - 13, ISSN 1077-260X, <DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2899757>	1-19
A	HASMAN E et al.. Polarization beam-splitters and optical switches based on space-variant computer-generated subwavelength quasi-periodic structures. Optics Communications, 20020801, Elsevier Amsterdam, NL, 01/08/2002, Vol. 209, Nº 1-3, páginas 45 - 54, ISSN 0030-4018, <DOI: 10.1016/S0030-4018(02)01598-5>	1-19

☐ En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos

☐ Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

* Categorías especiales de documentos citados:	"T"	documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.
"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.	"X"	documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.
"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.	"Y"	documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.
"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).	"&"	documento que forma parte de la misma familia de patentes.
"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.		
"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.		

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.
21/06/2021

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.
24 de junio de 2021 (24/06/2021)

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional
OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Nº de fax: 91 349 53 04

Funcionario autorizado
J. Botella Maldonado

Nº de teléfono 91 3495382

CLASIFICACIONES DE INVENCION

G02B5/18 (2006.01)

G02B5/30 (2006.01)

G02B6/24 (2006.01)