

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS  
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 913 576**

(21) Número de solicitud: 202031204

(51) Int. Cl.:

**G02F 1/31** (2006.01)  
**G02B 5/18** (2006.01)  
**G02B 6/12** (2006.01)  
**G02B 6/34** (2006.01)

(12)

## SOLICITUD DE PATENTE

A1

(22) Fecha de presentación:

**02.12.2020**

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

**02.06.2022**

(71) Solicitantes:

**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA (100.0%)**  
Avda. Cervantes, 2  
29071 Málaga (Málaga) ES

(72) Inventor/es:

**HADIJ EL HOUATI, Abdelfettah;**  
**MOLINA FERNANDEZ, Iñigo;**  
**WANGUEMERT PÉREZ, Juan Gonzalo;**  
**ORTEGA MOÑUX, Alejandro y**  
**HALIR, Robert**

(74) Agente/Representante:

**VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro**

(54) Título: **DEFLECTOR LATERAL DE HAZ ÚNICO, MULTIPLEXOR/DEMULITPLEXOR Y DISPOSITIVO ALIMENTADOR DE ANTENA ÓPTICA QUE INCORPORAN EL DEFLECTOR, Y MÉTODOS QUE LOS UTILIZAN**

(57) Resumen:

Deflectores laterales de haz único con índices de refracción efectivos de respectivas guíaondas de canal y de película de destino, índice de refracción de cubierta y de sustrato, y periodicidad  $\Lambda$  de la guíaonda de canal que cumplen las condiciones de difracción de haz único. Asimismo, multiplexores/demultiplexores de longitudes de onda, dispositivos alimentadores de antenas ópticas, y métodos que emplean todos ellos.

## DESCRIPCIÓN

DEFLECTOR LATERAL DE HAZ UNICO, MULTIPLEXOR/DEMULITPLEXOR

Y DISPOSITIVO ALIMENTADOR DE ANTENA OPTICA QUE INCORPORAN

5 EL DEFLECTOR, Y METODOS QUE LOS UTILIZAN

## SECTOR DE LA TÉCNICA

La presente invención se refiere al campo de la óptica integrada, y más

10 concretamente a los dispositivos basados en rejillas de difracción lateral.

## ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Los circuitos ópticos integrados son sistemas ópticos miniaturizados

15 compuestos por varios componentes que son fabricados en obleas utilizando

técnicas de deposición, crecimiento de materiales y litográficas similares a las utilizadas en microelectrónica. Mediante estas técnicas se fabrican en la oblea canales formados por materiales con diferente constante dieléctrica (guías de onda o guiaondas) que permiten conducir y manipular la luz por el plano de la

20 oblea con bajas pérdidas de potencia óptica. Estas guiaondas ópticas son los componentes fundamentales sobre los que se construyen los circuitos ópticos integrados.

En función de que proporcionen confinamiento en una o dos dimensiones las

25 guiaondas se dividen en: guiaondas de canal (con confinamiento en dos dimensiones) que permiten conducir la luz llevándola de un punto a otro dentro de la oblea y guiaondas de película, (confinamiento en una dimensión) que

permiten confinar la luz en el plano de la oblea pero dejando que se propague libremente un haz de luz en cualquier dirección dentro de la película.

30

El diseño de circuitos ópticos integrados se basa en la adecuada combinación de un conjunto de bloques elementales interconectados entre sí que permiten

realizar una funcionalidad deseada. Entre los bloques elementales más habituales se encuentran los acopladores, que son dispositivos que permiten manipular la forma que tiene la luz permitiendo transferirla entre diferentes guiaondas o entre una guiaonda y el espacio exterior al chip. Existen diversos 5 tipos de acopladores entre los que se encuentran: los divisores de potencia, los acopladores direccionales, los acopladores de interferencia multimodal, los conversores de tamaño de modo, los acopladores de 'chip' a fibra los acopladores de chip a espacio libre [1], los acopladores de estrella [2] o los deflectores [3], [4]. Los acopladores forman parte de la gran mayoría de 10 subsistemas ópticos integrados tales como moduladores, receptores, demultiplexores o filtros y son por ello componentes de una gran aplicación práctica en multitud de aplicaciones.

El deflector propuesto en [3] consiste en una guía de canal definida dentro de 15 una guía de película. Sobre la guía de canal se graba una rejilla de difracción que desvía lateralmente el modo guiado hacia un haz que se propaga por la guía de película haciendo uso del conocido principio físico de 'phase matching' o '*momentum matching*' que permite usar alguno de los órdenes de difracción no nulos de la estructura para conseguir el acople deseado. Una limitación de 20 este dispositivo es que para su funcionamiento eficiente el índice de refracción efectivo de la guía de película debe ser inferior al índice de refracción efectivo del modo guiado por la guía de canal. Esto es así pues en caso contrario se produciría un acople indeseado de potencia a través del orden cero de difracción que limitaría la eficiencia del dispositivo. En [4] se muestran 25 evidencias experimentales de este tipo de dispositivo sobre una tecnología de sol-gel, pero tiene las mismas limitaciones mencionadas para el dispositivo propuesto en [3]. El problema de estas configuraciones es que no son directamente realizables para situaciones en las que se deseé desviar lateralmente la potencia óptica desde una guía de canal a una guía de película 30 cuyo índice de refracción efectivo sea mayor que el del modo guiado pues en ese caso la eficiencia del dispositivo se reduciría notablemente debido a las filtraciones de potencia a través del orden de difracción nulo ('leakage').

En [5],[6] se propuso un nuevo tipo de deflector lateral basado en tecnología sub-longitud de onda (Subwavelength Grating, SWG) que permite transferir la potencia de un modo de una guía de canal a un haz que se propaga por una 5 guía de película cuyo índice de refracción es mayor que el del modo guiado, situación que ocurre en tecnología de silicio sobre aislante (Sol). Aunque en estos trabajos el deflector se sitúa sobre una circunferencia en una configuración que enfoca dicho haz y es usada para la multiplexación/demultiplexación de longitudes de onda, esto no cambia la 10 esencia básica del funcionamiento del deflector como tal. En el primer trabajo la guía de canal y la guía de película se separan entre si una cierta distancia y se adaptan mediante una estructura SWG ([5] fig 1.b) mientras que en el segundo trabajo se interpone un medio material artificial de tipo SWG entre la guía de canal y el slab ([6] fig 3.b), en ambos casos el efecto buscado es 15 disminuir la filtración ('leakage') directa entre la guía de canal y la guía de película debido al orden de difracción cero.

Más recientemente, en un trabajo detallado [7] de un deflector similar al presentado en [6] se realizó una optimización detallada del dispositivo poniéndose de manifiesto la existencia de unas elevadas pérdidas debido a la 20 radiación indeseada a la cubierta ('cladding') de la estructura. Una característica importante y limitativa en estos trabajos [5, Bock2008], [6, Bock2012], [7, Hadij-Elhouati2019] es que el diseño se realiza para tener un haz desviado en dirección casi perpendicular a la dirección de la guía de canal, es decir, la deflexión se produce en un ángulo cercano a los 90 grados, para 25 conseguir el comportamiento que dé lugar a la focalización del haz de manera lo más sencilla posible, al hacerlo así este tipo de dispositivo es susceptible de tener pérdidas de radiación a la cubierta ('cladding') elevadas que limitan la aplicabilidad del dispositivo. Como consecuencia de esto, otra limitación importante de estos trabajos es que, para intentar evitar las fugas de potencia 30 radiada en direcciones indeseadas, tienen que usar elementos difractivos 'blazed' lo que dificulta el diseño.

Existen en el estado de la técnica algunos otros dispositivos que permiten hacer la transferencia de potencia de una guía de canal a un haz guiado por una guía de película con un índice de refracción efectivo mayor que el índice de refracción efectivo de la guía de canal. Un ejemplo de esto aparece en el 5 conversor de modos descrito en [1]. Este dispositivo consta de dos secciones, una de las cuales denominada “*waveguide-to-slab mode expander*” realiza precisamente la función de transferir la potencia del modo de una guía de canal a un haz guiado por una guía de película. No obstante a diferencia de los trabajos [3]–[7] este tipo de acoplador funciona por filtración directa (‘leakage’) 10 y no contiene ninguna rejilla de difracción.

Es también conocido que las características de la propagación (pérdidas y desfase) de una señal óptica por una guía de canal pueden ser modificadas mediante la interacción con señales de control externas de diferente naturaleza. 15 En estos dispositivos se emplea algún mecanismo físico conocido para modificar la parte real (modulación de fase) o la parte imaginaria (modulación de amplitud) del índice de refracción del medio que constituye la guía lo que permite obtener una funcionalidad de modulación. Algunas técnicas bien conocidas incluyen: 1) los basados en efectos electro-ópticos que aprovechan 20 el efecto Pockels, el efecto Kerr o la dispersión de plasma de determinados materiales para cambiar la parte real de su índice de refracción mediante una señal eléctrica, 2) los moduladores de electro-absorción que hacen lo mismo pero modifican principalmente la parte imaginaria del índice de refracción, 3) los desfasadores termo-ópticos que utilizan el calentamiento del material 25 producido por una señal de control para cambiar la parte real de su índice de refracción. Dentro de la fotónica de silicio pueden encontrarse múltiples soluciones tecnológicas en el estado de la técnica que permiten realizar estas funciones. Algunos ejemplos de guías de canal con índice de refracción efectivo controlable son: WO2011/101632A1, es un modulador de dispersión de plasma 30 que permite modificar eléctricamente la parte real del índice de refracción; WO2007/061986A1 y [8] son moduladores de electro-absorción que permiten modificar eléctricamente la parte imaginaria del índice de refracción;

US8,098,968B2 y [9] que son moduladores termo-ópticos que permiten modular la parte real del índice de refracción.

El control del índice de refracción en guiaondas de canal ha sido utilizado en 5 una gran multitud de configuraciones para conseguir diferentes funcionalidades. Uno de los ejemplos más claros es la utilización del efecto electroóptico en un interferómetro de Mach-Zehnder para hacer moduladores de amplitud. Otros ejemplos incluyen la sintonía de filtros mediante el calentamiento local de resonadores en anillo, el ajuste y control de dispositivos 10 demultiplexores de longitud de onda, y conmutadores de luz entre diferentes guías de canal. Sin embargo, no existen en el estado de la técnica sistemas que permitan utilizar el control de la parte real e imaginaria del índice de refracción efectivo de una guiaonda de canal para manipular de forma eficiente las características (dirección, desfase del frente de onda, amplitud) de un haz 15 de luz que se propague libremente en cualquier dirección dentro de una guía de película.

Por otra parte, los multiplexores de longitud de onda son bloques fundamentales que permiten agregar en un solo canal físico información 20 modulada sobre portadoras ópticas de diferente longitud de onda. Son dispositivos bidireccionales por lo que el mismo dispositivo puede usarse para agregar diferentes longitudes de onda (multiplexor) o para separarlas (demultiplexor). Estos dispositivos son fundamentales en los sistemas de comunicaciones ópticas multiportadora, pero también encuentran aplicación en 25 otras situaciones como sensores, espectrómetros etc.

La mayor parte de multiplexores/demultiplexores ópticos integrados encontradas en el estado de la técnica responden a cuatro arquitecturas diferentes [10]: filtros de resonadores en anillo o 'Ring Resonators filters' (RRs), 30 filtros de celosía o 'Lattice-Form filter' (LFs), agrupaciones de guias o 'Arrayed Waveguide Gratings' (AWGs), y Echelle planos o 'Planar Echelle Gratings' (PEGs). En este sentido, los trabajos [5], [6] constituyen una notable excepción

puesto que se basan en una arquitectura poco frecuente que se basa en utilizar un deflector lateral basado en tecnología sub-longitud de onda SWG, colocado sobre un círculo en una típica geometría que enfoca el haz difractado por el deflector.

5

Los multiplexores/demultiplexores basados en AWG o PEG son las arquitecturas más prometedoras cuando se trata de conseguir un elevado número de canales. Los AWG basados en sílice son dispositivos ampliamente utilizados en los servicios actualmente desplegados [10], permitiendo un amplio margen de número y espaciado de canales (de denso a grueso) y una excelente diafonía. Sin embargo, su aplicación en la fotónica de silicio es difícil debido a dos circunstancias: por un lado, los dispositivos son muy sensibles a errores de fabricación que hacen que sea difícil alinear la posición de los canales en las posiciones deseadas; por otro lado, el coeficiente térmico del silicio es muy elevado lo que conduce a una alta variabilidad de la posición de los canales con la temperatura.

En el estado de la técnica existen soluciones para realizar diseños de AWGs y PEGs insensibles con la temperatura (atérmicos) [11] [12][13]. Sin embargo, los diseños atérmicos no consiguen solucionar el problema del desalineamiento de la respuesta del dispositivo debido a errores de fabricación, por lo que no son actualmente útiles para fabricación a gran escala.

Por tanto, son necesarias soluciones de control que permitan sintonizar los dispositivos de forma dinámica para alinear su respuesta en la rejilla deseada y que se mantenga la posición ante variaciones térmicas del entorno tal y como se propone en US8285149B2. En fotónica del silicio, debido a su alto coeficiente termo-óptico, el ajuste dinámico de los dispositivos demultiplexores AWG se puede realizar térmicamente mediante moduladores termo-ópticos (calentadores) [14][15] [16]. Sin embargo, estas soluciones ofrecen una baja eficiencia energética (del orden de 4-5 nm/W en el estado de la técnica) debido a que por su geometría necesitan calentar un área del 'chip' muy amplia. Para

mejorar la eficiencia energética para la sintonía de los AWG se han propuesto geometrías específicas para los calentadores en la US20170023736A1. Mientras que para el alineamiento de los PEG existen soluciones basadas en la periodización de la respuesta en frecuencia de los dispositivos como en 5 US8873961B2. No obstante, la sintonía energéticamente eficiente de los demultiplexores de un elevado número de canales sigue siendo un problema sin una solución satisfactoria en el estado de la técnica.

10 Los demultiplexores presentados en [5], [6], basados en el uso de un deflector lateral en tecnología sub-longitud de onda SWG, no son utilizados habitualmente en situaciones prácticas pues presentan elevadas pérdidas debidas a la radiación a la cubierta y no permiten sintonizar dinámicamente la posición de los canales para alinearlos en las posiciones deseadas.

15 Los arrays de antenas ópticas (Optical Phased Arrays, OPA) son sistemas ópticos integrados que permiten generar haces ópticos muy estrechos cuya dirección puede ser controlada electrónicamente, es decir, sin partes móviles. Estos dispositivos encuentran aplicación en diversos sistemas como los LIDAR (Light Detection and Ranging) usados para los vehículos autónomos o las 20 comunicaciones FSO (Free Space Optical).

Los OPA comprenden un conjunto de antenas ópticas en estrecha proximidad, que juntas forman y dirigen haces ópticos cuya elevación ( $\theta$ ) y acimut ( $\psi$ ) dependen de la fase relativa de los campos irradiados por las rejillas [17].

25 En la fotónica del silicio, se han propuesto dos tipos básicos de OPA: i) agrupaciones bidimensionales de nano o micro-antenas de rejilla muy cortas [18], US9476981B2 y ii) agrupaciones unidimensionales de rejillas de difracción largas y débilmente radiantes [19], US9964833B2. En el primer caso, la 30 conformación y dirección del haz en elevación y acimut se logra mediante el ajuste del desfase relativo de la alimentación de cada emisor individual; en el segundo, el ángulo de elevación ( $\theta$ ) se escanea cambiando la longitud de onda

operativa (lo que cambia el ángulo de radiación de cada rejilla de difracción), mientras que el ángulo de acimut ( $\psi$ ) se ajusta mediante desfasadores, normalmente termo-ópticos, que modifican el desfase relativo de la alimentación de cada rejilla de difracción. En ambos casos, la solución

5 propuesta se basa en alimentar cada elemento del array mediante guiaondas con confinamiento bidimensional siendo posible el ajuste (del acimut y/o elevación) mediante el desfase introducido por cada guiaonda de alimentación mediante un conjunto de desfasadores que actúan individualmente sobre cada guía de alimentación. En el estado de la técnica es posible encontrar soluciones

10 relacionadas con este campo, (US20170371227A1, US10656496B2, US10191145B2, pero en todas ellas es necesario incluir una pluralidad de desfasadores diferentes para conseguir el escaneo en al menos una de las dimensiones. Uno de los problemas de estas configuraciones en la tecnología de silicio, es que con mucha frecuencia el control de fase de alimentación de

15 cada elemento radiante se realiza mediante un desfasador termo-óptico, lo que da lugar a soluciones energéticamente ineficientes, de baja velocidad de escaneo y a problemas de aislamiento entre los diferentes elementos del agrupamiento. En el estado de la técnica existen algunas soluciones parciales para mejorar estos aspectos [20], pero no existen soluciones en los que se

20 utilice un deflector lateral de haz como elemento de alimentación de la antena óptica para la radiación de haces estrechos controlables simultáneamente en acimut y elevación.

La solución propuesta en [1] para generar un haz radiado de gran anchura a

25 partir de un modo guiado por una guía de canal consta de dos secciones: la primera sección es un deflector lateral que tiene la función de transferir la potencia del modo de la guiaonda de canal a un haz guiado por una guía de película; ese haz guiado por la película se hace incidir sobre un grating de radiación que funciona como antena óptica. El deflector lateral propuesto en [1]

30 se basa en la difracción de orden 0 ('leakage').

## REFERENCIAS

- [1] S. Kim *et al.*, "Photonic waveguide to free-space Gaussian beam extreme mode converter," *Light Sci. Appl.*, vol. 7, no. 1, p. 72, Dec. 2018.
- [2] C. Dragone, "Efficient N\*N star couplers using Fourier optics," *J. Light. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 479–489, Mar. 1989.
- 5 [3] H. M. Stoll, "Distributed Bragg deflector: a multifunctional integrated optical device," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 16, pp. 2562–2569, Aug. 1978.
- [4] R. L. Davis *et al.*, "Distributed Bragg deflectors fabricated in sol-gel based waveguides," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, no. 2, pp. 464–466, Feb. 2004.
- 10 [5] P. J. Bock *et al.*, "Demultiplexer with blazed waveguide sidewall grating and sub-wavelength grating structure," *Opt. Express*, vol. 16, no. 22, pp. 17616–17625, Oct. 2008.
- [6] P. J. Bock *et al.*, "Demonstration of a curved sidewall grating demultiplexer on silicon," *Opt. Express*, vol. 20, no. 18, p. 19882, Aug. 15 2012.
- [7] A. Hadj-Elhouati *et al.*, "Distributed Bragg deflector coupler for on-chip shaping of optical beams," *Opt. Express*, vol. 27, no. 23, 2019.
- [8] S. A. Srinivasan *et al.*, "56 Gb/s Germanium Waveguide Electro-Absorption Modulator," *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 2, pp. 419–424, Jan. 20 2016.
- [9] A. Masood *et al.*, "Comparison of heater architectures for thermal control of silicon photonic circuits," *IEEE Int. Conf. Gr. IV Photonics GFP*, vol. 2, pp. 83–84, 2013.
- [10] K. Okamoto, "Wavelength-division-multiplexing devices in thin SOI: Advances and prospects," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 248–257, 2014.
- 25 [11] L. Wang *et al.*, "Athermal arrayed waveguide gratings in silicon-on-insulator by overlaying a polymer cladding on narrowed arrayed waveguides," *Appl. Opt.*, 2012.
- [12] X. J. M. Leijtens, B. Kuhlow, and M. K. Smit, "Arrayed waveguide gratings," *Springer Ser. Opt. Sci.*, pp. 1–5, 2006.
- 30 [13] D. Melati *et al.*, "Athermal echelle grating filter in silicon-on-insulator using

- a temperature-synchronized input," *Opt. Express*, vol. 26, no. 22, p. 28651, 2018.
- 5 [14] S. Tondini, C. Castellan, M. Mancinelli, C. Kopp, and L. Pavesi, "Methods for Low Crosstalk and Wavelength Tunability in Arrayed-Waveguide Grating for On-Silicon Optical Network," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 23, pp. 5134–5141, 2017.
- 10 [15] Y. Yang *et al.*, "Thermo-Optically Tunable Silicon AWG with above 600 GHz Channel Tunability," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 27, no. 22, pp. 2351–2354, 2015.
- [16] Y. Xie *et al.*, "Thermally-Reconfigurable Silicon Photonic Devices and Circuits," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 5, pp. 1–20, Sep. 2020.
- 15 [17] M. J. R. Heck, "Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering," *Nanophotonics*, vol. 6, no. 1, pp. 93–107, Jan. 2017.
- [18] H. Abediasl and H. Hashemi, "Monolithic optical phased-array transceiver in a standard SOI CMOS process," *Opt. Express*, vol. 23, no. 5, p. 6509, 2015.
- 20 [19] C. V. Poulton *et al.*, "Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays," *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 20, p. 4091, 2017.
- [20] P. A. K. Yepez, U. Scholz, J. N. Caspers, and A. Zimmermann, "Novel Measures for Thermal Management of Silicon Photonic Optical Phased Arrays," *IEEE Photonics J.*, vol. 11, no. 4, Aug. 2019.

25 **DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN**

La presente invención, tal como se define en las reivindicaciones independientes, resuelve problemas de las soluciones arriba mencionadas. Realizaciones preferidas de la invención se definen en las reivindicaciones 30 dependientes.

En un primer aspecto de la invención, se propone una rejilla de difracción

definida sobre una guiaonda de canal cuya luz difractada es capturada enteramente por una guiaonda de película (slab). En lo sucesivo, este dispositivo es denominado deflector lateral de haz único.

- 5 Ventajas que presenta el deflector lateral de haz único en realizaciones del mismo son:
- Permite acoplar la luz entre una guiaonda de canal y una guiaonda de película, incurriendo en pérdidas despreciables en dicho proceso, incluso cuando el índice de refracción efectivo de la guía de película es

10 superior al índice de refracción efectivo de la guía de canal.

  - La forma del haz de luz que se acopla a la guiaonda de canal se puede controlar variando de forma progresiva la geometría de los elementos difractivos que conforman la rejilla de difracción del deflector.
  - Permite cambiar dinámicamente la forma y dirección del haz radiado

15 mediante el uso de cualquiera de las técnicas conocidas que permiten modificar eléctricamente las características ópticas de una guía de canal, como por ejemplo el índice de refracción y/o las perdidas.

20 A continuación, se describen otros aspectos de la invención, que hacen uso del deflector lateral de haz único:

Un segundo aspecto de la invención es un deflector lateral de haz único, primer aspecto de la invención, cuya dirección de propagación y forma del haz generado dentro de la guiaonda de película de destino puede ser ajustada

25 dinámicamente mediante el control del índice de refracción de la guiaonda de canal por medio de una señal de tipo eléctrico. Para llevar a cabo este control, se puede usar cualquiera de los moduladores conocidos en el estado de la técnica incluyendo, de forma no limitativa, a aquellos basados en: 1) calentadores controlables eléctricamente colocados en la proximidad de la

30 guiaonda de canal (efecto termo-óptico); 2) la aplicación, mediante terminales adecuados, de un campo eléctrico en la guía de canal que a través del efecto electro-optico (efecto Pockels, efecto Kerr) modifica su índice de refracción

efectivo ; 3) uniones semiconductoras situadas en la proximidad de la guía de canal que, a través del efecto de dispersión de plasma modifica el índice de refracción de la guía y/o modifica la atenuación que la guía provoca sobre la señal óptica.

5

Un tercer aspecto de la invención es un multiplexor/demultiplexor de longitudes de onda que hace uso del conformador de haz, objeto del primer y/o segundo aspecto de la invención, que es colocado sobre una geometría enfocante (*'focusing'*) como puede ser típicamente una circunferencia de radio  $R$ , que

10 produce que el haz difractado se enfoque dentro de la guiaonda de película. En dicha configuración, debido a la dispersión que introduce la rejilla de difracción, el punto focal se moverá muy aproximadamente sobre la llamada circunferencia de Rowland, una circunferencia de radio  $R/2$  que se encuentra dentro y es tangente a la circunferencia sobre la que se coloca el deflector. Sobre la 15 circunferencia de Rowland se colocan varias guías de canal adecuadamente dimensionadas para capturar la luz enfocada. De esta manera diferentes longitudes de onda serán capturadas por guías de canal receptoras distintas separando espacialmente de esta manera las longitudes de onda.

20 Un cuarto aspecto de la invención es la utilización del deflector lateral de haz único como alimentador de una rejilla de difracción que actúa como antena óptica siguiendo un esquema parecido al usado en [1]. En el esquema propuesto se utiliza un deflector de haz único, primer aspecto de la invención, para transferir la potencia del modo de la guiaonda de canal a un haz guiado 25 por una guía de película. La dirección de dicho haz puede ser modificada dinámicamente, con gran eficiencia energética, variando el índice de refracción efectivo de la guía de canal mediante cualquiera de los procedimientos descritos en el segundo aspecto de la invención. El haz atrapado por la guía de película se hace incidir sobre un grating de radiación vertical que actúa como 30 antena óptica. La disposición de estos elementos permite controlar simultáneamente el acimut y la elevación del haz radiado mediante el ajuste de la longitud de onda de trabajo (que realiza un escaneo simultaneo en azimut y

elevación) y el control del ángulo del haz acoplado a la guía de película por el deflector lateral de haz único, que permite controlar el azimut del haz radiado.

En una primera configuración, el deflector lateral de haz único, primer aspecto 5 de la invención, comprende: un sustrato, sobre el que se dispone una guiaonda de canal y en proximidad de esta se encuentra una guiaonda de película. Todos los elementos mencionados están cubiertos por un material de cubierta. El dispositivo tiene definida una rejilla de difracción periódica, con periodo  $\Lambda$ , en la dirección de propagación, que está grabada preferentemente, pero de forma 10 no limitativa sobre la guiaonda de canal.

Todos los elementos que componen el deflector de haz único pueden estar compuestos por materiales isótropos, anisótropos o bien por metamateriales artificiales como los materiales sub-longitud de onda ('Sub-Wavelength 15 Gratings', SWG), que sintetizan un material anisótropo. Además, en el caso más general los materiales de sustrato, cubierta, guía de canal y guía de película pueden ser todos distintos entre sí. A continuación, se asume, por simplicidad y sin pérdida de generalidad, que todos los materiales usados son isótropos y que sustrato y cubierta están formados por el mismo material con 20 índice de refracción  $n_a$ .

Nótese que el deflector lateral de haz único aquí propuesto se puede ver, en su forma más simple, como tres medios de trasmisión puestos en proximidad: la guía de canal, la guía de película y el medio que los rodea y que puede llegar 25 a considerarse homogéneo e infinito.

La guiaonda de canal periódicamente perturbada se caracteriza por el índice de refracción efectivo que presenta el modo fundamental Floquet-Bloch  $n_B$  para la longitud de onda de trabajo y la polarización de trabajo, que puede ser TE o 30 TM. Los modos Floquet-Bloch se pueden expresar como la superposición de ondas planas no homogéneas cuyos vectores de onda vienen dados por

$$\overrightarrow{k_{B,r}} = (k_0 n_B - r \cdot 2\pi/\Lambda) \cdot \hat{z}, \quad (1)$$

donde,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  es el número de onda en el vacío,  $\hat{z}$  es el vector unitario en dirección z positiva (la dirección de propagación de la guía de canal) y  $r$  es un numero entero que designa el orden de difracción.

- 5 Por otro lado, el modo fundamental de la guiaonda de película polarizado según la polarización de trabajo (TE o TM), para el caso particular de que esté formada por un material isótropo, está caracterizada por el índice de refracción efectivo  $n_s$  y es independiente de la dirección de propagación dentro de la guiaonda de película para el caso isótropo. Nótese que para que se dé confinamiento  
10 bidimensional en la guía de canal, el índice de refracción efectivo de la guía de película  $n_s$  debe ser menor que el de la guiaonda de canal  $n_B$ . Esto se puede conseguir de diversas maneras: usando el mismo material para las guías de película y de canal pero fijando el grosor  $H_s$  de la guía de película a un valor menor que el grosor de la guiaonda de canal  $H_B$ ; alternativamente, puede  
15 usarse en ambas guías el mismo grosor y usar en la guía de película un material o un metamaterial sintético con índice de refracción menor al que forma la guiaonda de canal; también cabe usar una combinación de ambas estrategias.
- 20 Las ondas que pueden propagarse en la guía de película deberán cumplir la relación de dispersión de un medio infinito bidimensional. Es decir, los vectores de onda de las ondas que se propagan dentro de la guiaonda de película deben cumplir que:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{k_s}(\theta) &= (k_{s,x} \cdot \hat{x} + k_{s,z} \cdot \hat{z}) , \\ |k_{s,x}|^2 + |k_{s,z}|^2 &= \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} n_s\right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

- 25 donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda en el vacío. Dichas ondas se propagan con un  
ángulo  $\theta$  respecto al eje x dado por

$$\tan(\theta) = \frac{k_{s,z}}{k_{s,x}} \quad (3)$$

Mientras tanto, en sustrato y cubierta debe cumplirse la conocida relación de dispersión de las ondas planas homogéneas en un medio isótropo homogéneo e infinito:

$$\vec{k}_a = k_{a,x} \cdot \hat{x} + k_{a,y} \cdot \hat{y} + k_{a,z} \cdot \hat{z},$$

$$|k_{a,x}|^2 + |k_{a,y}|^2 + |k_{a,z}|^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} n_a\right)^2 \quad (4)$$

- 5 Por otro lado, una condición necesaria para que se produzca el acople eficiente de potencia desde la guiaonda de canal a alguno de los demás medios de transmisión es la llamada condición de '*phase-matching*' o '*momentum-matching*', es decir,  $k_{s,z} = k_{a,z} = (k_0 n_B - r \cdot 2\pi/\Lambda)$
- 10 Así, para conseguir acople entre la guiaonda de canal y la guiaonda de película e impedir cualquier acople indeseado a la cubierta o sustrato se puede diseñar el periodo y la geometría de la guía de canal para que la condición de '*momentum-matching*' pueda darse entre la guía de canal y la guía de película, pero que no se pueda cumplir entre la guía de canal y el sustrato o la cubierta.
- 15 Para que no pueda cumplirse la condición de '*momentum-matching*' y por tanto impedir el acople de potencia entre la guía de canal y el sustrato o cubierta debe cumplirse para todos los enteros  $r$  que:

$$\left|k_0 n_B - r \cdot \frac{2\pi}{\Lambda}\right| > k_0 \cdot n_a \quad (5)$$

- Por otro lado, para que pueda darse acople de potencia de la guía de canal hacia la guía de película en un único haz, debe cumplirse que exista un único orden de difracción  $r$  que cumpla:
- 20

$$\left|k_0 n_B \mp r \cdot \frac{2\pi}{\Lambda}\right| < n_s k_0 \quad (6)$$

- El cumplimiento simultáneo de las dos desigualdades (5) y (6) permite la operación del deflector en el modo de haz único, permitiendo el acople eficiente de la potencia óptica entre las guías de canal y de película, evitando la radiación de potencia hacia el sustrato y cubierta. Para el caso más habitual en la fotónica
- 25

de silicio esta condición es posible encontrarla para el orden de difracción  $r = -1$  en cuyo caso la condición de operación de haz único se simplifica en:

$$-n_s < n_B - \frac{\lambda}{\Lambda} < -n_a \quad (7)$$

Debe notarse que, aunque por simplicidad la descripción de este principio de operación se ha realizado bajo el supuesto de que el sustrato y la cubierta tuvieran el mismo índice de refracción  $n_a$ , las expresiones (5) y (7) pueden generalizarse al caso de índices de sustrato y cubierta diferentes con tan solo elegir el valor de  $n_a$  como mayor de entre los dos índices de refracción de los materiales que componen el sustrato o la cubierta.

10

Esta condición se puede ver de forma equivalente como que el orden de difracción -1 debe difractarse dentro de la guiaonda de película con un ángulo  $\theta$  con respecto a la dirección perpendicular a la dirección de propagación y contenida en el plano de la guiaonda de película que en magnitud, este ángulo  $\theta$ , es superior al arcoseno( $n_a/n_s$ ). En el caso de que los índices de refracción de cubierta ( $n_c$ ) y sustrato ( $n_a$ ) sean distintos, la condición anterior aplicará sobre el mayor de los dos, es decir: la magnitud del ángulo  $\theta$  deberá ser superior a arcoseno( $\max\{n_a, n_c\}/n_s$ )

20 Cuando dicha condición se cumple el dispositivo idealmente difracta de forma progresiva la luz guiada por la guiaonda de canal hacia la guiaonda de película exclusivamente y en una única dirección dentro de esta. Es importante notar que esta condición de haz único se dará independientemente de cómo se introduzca la periodicidad en la guiaonda de canal, siendo lo único importante 25 el periodo  $\Lambda$  y el índice de refracción efectivo del modo Floquet-Bloch fundamental  $n_B$ . De esta manera y a modo de ejemplos, se podría conseguir la periodicidad deseada variando el índice de refracción que constituye la guiaonda de canal a lo largo de la dirección de propagación, también se podría conseguir la periodicidad deseada modificando la anchura de la guía  $W(z)$  de 30 forma periódica a lo largo de la dirección de propagación  $z$ , otra alternativa sería

colocar bloques de carga a lo largo de dirección de propagación en la proximidad de la guiaonda de canal.

El haz generado por el deflector lateral de haz único puede ser arbitrariamente 5 conformado en amplitud y fase. Para ello, se deben concatenar, siguiendo la dirección de propagación de la onda luminosa por la guía de canal, una pluralidad de secciones de deflectores laterales de haz único cuya geometría se varía, preferiblemente de manera suave, a lo largo de la dirección de propagación con el fin de conformar la amplitud y/o la fase de la onda difractada, 10 manteniéndose la condición de radiación de haz único en cada sección. Por ejemplo, en el caso del deflector cuya rejilla de difracción se basa en una variación sinusoidal de la anchura, es decir,  $W(z) = W_g \cdot \left(1 + D_g \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} \cdot z\right)\right)$ , esto se podría conseguir variando la profundidad de modulación  $D_g(z)$  a lo largo 15 de la dirección de propagación  $z$  para ajustar el módulo del haz difractado y ajustando el periodo  $\Lambda(z)$  para ajustar la fase del haz radiado.

Para poder conseguir esto, primero se debe calcular la variación de fuerza de radiación que se requiere a lo largo de la dirección de propagación en el deflector  $\alpha(z)$  para conseguir un determinado módulo de perfil de campo 20 difractado  $|g(z)|$  mediante la expresión:

$$\alpha(z) = \frac{|g(z)|^2}{2 \left( \frac{1}{C_{rad}} - \int_{-\infty}^z |g(\tau)|^2 d\tau \right)} \quad (8)$$

donde  $C_{rad}$  es la proporción de potencia entrante al deflector que se quiere acoplar a la guiaonda de película y  $|g(z)|^2$  está normalizado de manera que  $\int_{-\infty}^{+\infty} |g(z)|^2 dz = 1$ .

25

Por otro lado, mediante análisis modal Bloch-Floquet se puede realizar el diseño de cada uno de los dientes del deflector para que sintetice la fuerza de radiación deseada  $\alpha(z)$ .

La guiaonda de película en el caso de estar formada por un material anisótropo o una estructura SWG presentará un índice de refracción efectivo  $n_s(\theta) = |\vec{k}_s(\theta)|/k_0$  que dependerá de la dirección de propagación dentro de esta guiaonda definida por vector de propagación como  $\theta = \angle \vec{k}_s(\theta)$ . Es decir, la 5 expresión (2) que define un círculo en el diagrama de vectores de onda ya no es válida. En este caso, los vectores de onda permitidos dentro de la guiaonda de película dibujan una elipse. En esta situación, se fija el parámetro  $n_s$  de la expresión (7) a aquel índice de refracción efectivo que resulte de maximizar la proyección del vector de onda normalizado  $\vec{k}_s(\theta)/k_0$  sobre la dirección de 10 propagación dentro de la guiaonda de canal, eje z en este caso, con respecto a la dirección de propagación dentro de la guiaonda de película  $\theta$ . Es decir,

$$n_s = \max_{\theta} \left\{ \frac{|\vec{k}_s(\theta) \cdot \hat{z}|}{k_0} \right\}. \quad (9)$$

En el supuesto de que el sustrato y la cubierta estén formados por dos materiales isótropos distintos caracterizados por índices de refracción  $n_s$  y  $n_c$  15 respectivamente entonces en la condición (7) se deberá fijar  $n_a$  al mayor de los índices. Es decir,  $n_a = \max \{n_s, n_c\}$ .

La guiaonda de canal del primer aspecto de la invención podría ser preferentemente de uno de los siguientes tipos: guía de canal, guía *rib* o guía 20 difusa.

Preferentemente, el deflector de haz único está implementado en tecnología de silicio sobre aislante (SOI) en donde el material del substrato es dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), el material de cubierta preferentemente puede seleccionarse entre 25 aire, dióxido de silicio o un polímero, el material que constituye la guiaonda de canal es silicio y el material de la guiaonda de película preferentemente silicio o un metamaterial realizado con la combinación de silicio y el material de cubierta.

30 Una segunda configuración del deflector lateral de haz único permite resolver

eficientemente una situación de mayor utilidad, que se produce cuando se desea transferir potencia desde una guiaonda de canal con índice de refracción efectivo  $n_B$  a una guía de película de destino cuyo índice de refracción efectivo  $n_s$  es mayor que el del índice de refracción efectivo de la guiaonda de canal. En

5 este caso no es posible poner en proximidad la guía de película de destino con la guía de canal pues se produciría transferencia de potencia ('leakage') a través del orden 0 de difracción. Para resolver esta situación la solución que se propone es colocar en proximidad de la guía de canal una guiaonda de película auxiliar con índice de refracción efectivo  $n_{aux}$  menor al índice de refracción efectivo de la guiaonda de canal  $n_B$  y con anchura  $W_{aux}$ . De esta manera, el deflector formado con esta guiaonda auxiliar es capaz de cumplir la condición de difracción de haz único, descrita por las expresiones (5), (6) y (7), evitando de esa forma las perdidas por difracción al sustrato y/o cubierta. El dispositivo tiene definida una rejilla de difracción periódica, con periodo  $\Lambda$ , en la dirección

10 de propagación, que está grabada preferentemente, pero de forma no limitativa, sobre la guiaonda de canal.

En esta configuración la guía de película auxiliar se sitúa separando la guiaonda de canal de la guía de película de destino a la que se desea transferir finalmente

20 la potencia. La guía de película auxiliar proporciona la doble función de: a) permitir la deflexión sin pérdidas desde la guía de canal hacia la guía de película auxiliar y b) evitar la difracción directa desde la guía de canal a la guía de película de destino a través del orden de difracción cero ('leakage'). Para permitir la deflexión sin pérdidas debe elegirse adecuadamente el índice de

25 refracción efectivo de la guía de película auxiliar  $n_{aux}$  para que cumpla la condición de radiación de haz único. Para evitar la difracción directa desde la guía de canal a la guía de película de destino debe ajustarse el ancho de la guía de película auxiliar  $W_{aux}$  para que el campo evanescente del modo de la guía de película esté suficientemente atenuado para que el 'leakage' directo

30 sea reducido hasta el valor deseado.

La guía de película auxiliar puede fabricarse de diferentes maneras incluyendo

las siguientes alternativas: a) usar el mismo material que el usado para la guía de película de destino o para la guía de canal pero fijar el grosor de la guía auxiliar  $H_{aux}$  a un valor diferente de las usadas para las guiaondas de canal  $H_B$  y de película de destino  $H_s$ ; b) alternativamente, es posible usar en la guía de

- 5 pelicula auxiliar el mismo grosor que el usado en la guía de canal o en la guía de película de destino; c) es posible usar en la guía de película auxiliar un material o un metamaterial sintético con índice diferente al usado en la guía de canal o en la guía de película de destino; d) también cabe usar una combinación de ambas estrategias.

10

Nótese que, en esta segunda configuración, la operación del deflector lateral de haz único funciona en dos pasos: a) transfiriendo primero la potencia desde el modo de la guía de canal (de índice de refracción efectivo  $n_B$ ) a un haz único que se propaga en la guía de película auxiliar (de índice de refracción efectivo

- 15  $n_{aux} < n_B$ ) y b) transfiriendo posteriormente la potencia del haz que se propaga en la guía de película auxiliar a la guiaonda de película de destino (de índice de refracción  $n_s > n_B$ ). La transferencia de potencia desde la guía de película auxiliar hacia la guía de película de destino es posible hacerla directamente, poniendo en suficiente proximidad una de la otra, o bien mediante una  
20 estructura de adaptación modal intermedia de anchura  $W_{adapt}$  que optimice la transmisión de potencia entre las dos guiaondas de película, minimizando las perdidas por reflexión y radiación en la transición.

Un aspecto de la invención asociado al primer aspecto de la invención se refiere  
25 a un método que comprende: proporcionar un deflector lateral de haz único de acuerdo con la primera configuración antes descrita y/o la segunda configuración antes descrita; e introducir una señal óptica con una longitud de onda y polarización de trabajo en el deflector, particularmente en la guiaonda de canal del deflector.

30

Otro aspecto de la invención asociado al primer aspecto de la invención se refiere a un método que comprende: proporcionar una concatenación de

secciones de deflectores laterales de haz único de acuerdo con la primera configuración antes descrita y/o la segunda configuración antes descrita; e introducir una señal óptica con una longitud de onda y polarización de trabajo en una sección de deflector lateral, particularmente en la guiaonda de canal de

- 5 la sección de deflector lateral; las secciones están concatenadas en la dirección de propagación de la señal óptica por la guiaonda de canal, y una geometría de la guiaonda de canal está adaptada para conformar una amplitud y/o fase de una onda difractada, manteniéndose la condición de radiación de haz único en cada sección.

10

Realizaciones descritas con relación al primer aspecto de la invención son igualmente aplicables a estos aspectos de la invención asociados a dicho primer aspecto de la invención.

- 15 Un segundo aspecto de la invención es un deflector lateral de haz único cuyo haz generado puede ser ajustado dinámicamente y localmente en amplitud y fase (y por tanto también en dirección), mediante cualquiera de los efectos conocidos para modular la fase y la amplitud de una onda que se propaga por una guía dieléctrica incluyendo, de forma no excluyente, a los moduladores por: efecto

20 Pockels, efecto Kerr, dispersión de plasma, electro-absorción o moduladores termo-ópticos, o cualquier otro tipo de modulador descrito en el estado de la técnica que actúe permitiendo el ajuste de las pérdidas y/o el índice de refracción efectivo de la guía de canal que forma parte del deflector de haz único.

25

Para llevar a cabo el ajuste de fase se debe dotar a la guiaonda de canal de electrodos y/o materiales que permitan cambiar el índice de refracción del modo que se propaga por la guía por cualesquiera efectos conocidos: ópticos, eléctricos, térmicos, etc.. En este último caso, que es especialmente frecuente

30 en la fotónica de silicio debido a su elevado coeficiente termo-óptico, se deberán usar calentadores eléctricos que se ponen en proximidad de la guiaonda de canal que forma parte del deflector. De esta manera, una señal

eléctrica aplicada sobre los calentadores varía localmente el índice de refracción de la guiaonda de canal y este cambio en el índice de refracción se traslada al índice de refracción efectivo de modo Floquet  $n_{B,0}$  que controla la fase del campo difractado.

5

En general y de forma aproximada, puede decirse que mediante uno o varios moduladores que actúen a lo largo de la coordenada longitudinal del dispositivo ( $z$ ) es posible controlar localmente el índice de refracción efectivo del modo que se propaga por la guía de canal  $n_{B,0}(z)$ . Esta variación de índice de refracción efectivo inducida por el modulador  $\Delta n_B(z)$  provoca un desfase local del frente de onda difractado  $\phi(z)$  que viene dado por

$$\phi(z) = \int_0^z \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_B(z') dz'. \quad (10)$$

En el caso más sencillo, en el que un único modulador se dispone de forma homogénea a lo largo de todo el deflector, la aplicación de la señal de control

15

introduce un cambio de índice de refracción efectivo que es constante a lo largo del deflector  $\Delta n_B(z) = \Delta n_B = cte.$  lo que provoca un desfase acumulado que crece linealmente a lo largo del dispositivo  $\phi(z) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_B z$ . Este cambio de fase provoca un giro del frente de la onda difractado y, de esta manera, es posible ajustar eléctricamente la dirección  $\theta$  en la cual se propaga el haz difractado dentro de la guiaonda de película, obteniéndose de forma sencilla la funcionalidad que permite variar el ángulo del haz  $\theta$  mediante una señal de control eléctrica. La variación de ángulo de propagación  $\Delta\theta$  dentro de la guiaonda de película de índice de refracción efectivo  $n_s$  cuando se produce una variación  $\Delta n_B$  en el índice de refracción efectivo Floquet-Bloch se puede

20

25 obtener de forma inmediata como

$$\Delta\theta = \frac{1}{n_s \cdot \cos(\theta_0)} \cdot \Delta n_B \quad (11)$$

La invención no es limitativa al uso de moduladores termoeléctricos, pues el mismo efecto de control sobre el frente de fase de la onda difractada puede

realizarse mediante cualquiera otro de los medios utilizados para modular la fase de una onda guiada por una guía dieléctrica de canal, como pueden ser los moduladores basados en efecto electro-óptico, moduladores ópticos o moduladores por dispersión de plasma, cada uno de los cuales requiere de una 5 disposición especial de electrodos y/o materiales alrededor de la guía de canal que son conocidos en el estado de la técnica.

De forma similar, es posible utilizar moduladores que basados en la electro-absorción u otros efectos reportados en el estado de la técnica, actúen 10 localmente sobre la atenuación sufrida por la onda que se propaga por la guía de canal. De esta forma es también posible variar localmente la amplitud de la onda que se propaga a lo largo del dispositivo, lo que permite conformar localmente la amplitud del haz difractado. Nótese que la conformación de haz basada en este principio de funcionamiento se basa en una relación entre la 15 atenuación local introducida por el modulador  $\alpha(z)$  y la amplitud local de la onda difractada  $g(z)$  que se rige por una ecuación similar a la ecuación (8), lo que permite adecuar el perfil de atenuación al perfil del haz deseado.

Un aspecto de la invención asociado al segundo aspecto de la invención se 20 refiere a un método que comprende: proporcionar un deflector lateral de haz único de acuerdo con el primer aspecto de la invención (según la primera configuración antes descrita y/o la segunda configuración antes descrita); introducir una señal óptica con una longitud de onda y polarización de trabajo en el deflector lateral, particularmente en la guiaonda de canal del deflector; 25 proporcionar un modulador a lo largo de la guiaonda de canal del deflector para modificar el índice de refracción efectivo de la guiaonda de canal mediante uno o más de: moduladores termo-ópticos, moduladores electro-ópticos, moduladores de dispersión de plasma, o moduladores electroacústicos; y controlar dinámicamente, por medio del modulador proporcionado, un ángulo 30 con el que se desvía el haz único en la guiaonda de película de destino del deflector. Realizaciones descritas con relación al segundo aspecto de la invención son igualmente aplicables a este aspecto de la invención asociado a

dicho segundo aspecto de la invención.

Un tercer aspecto de la invención es un multiplexor/demultiplexor de longitudes de onda que hace uso del deflector de haz único, primer aspecto de la invención 5 o del deflector de haz único ajustable dinámicamente (segundo aspecto de la invención). La funcionalidad demultiplexora surge de la naturaleza dispersiva del deflector pues el ángulo  $\theta$  con el cual se propaga la luz difractada dentro de la guiaonda de película varía con la longitud de onda. Por ejemplo, en el caso de que la guiaonda de película este compuesta por un material isótropo y qué 10 el modo fundamental de esta guía tenga índice de refracción  $n_s$  para la polarización de trabajo, el ángulo de propagación  $\theta$  vendrá dado por:

$$\theta = \arcsin \left( \frac{n_{B,0} - \frac{\lambda_0}{\Lambda}}{n_s} \right) \quad (12)$$

donde,  $n_{B,0}$  es el índice de refracción efectivo del modo Floquet fundamental de la guiaonda de canal,  $\lambda_0$  es la longitud de onda de trabajo,  $\Lambda$  es la periodicidad de la perturbación de la guiaonda de canal.

15

De esta manera, un deflector de haz único, cuyo haz, preferentemente, está conformado para tener una amplitud Gaussiana, se sitúa sobre una curva que enfoca, preferentemente una circunferencia de radio  $R$ , en cuyo interior se encuentra la guía de película. En esta configuración, la luz difractada se enfocará sobre un punto dentro de la guía de película que cambiará con la longitud de onda. De este modo, se separa espacialmente la luz correspondiente a diferentes longitudes de onda. En el caso de usar como curva que enfoca una circunferencia la trayectoria que sigue el punto focal a medida que varía la longitud de onda corresponderá muy aproximadamente 20 con la llamada circunferencia de Rowland. La circunferencia de Rowland es una circunferencia que: 1) tiene de radio la mitad del radio del círculo sobre el que se coloca el deflector, 2) está en el interior de la circunferencia sobre la que se coloca el deflector y 3) estas dos circunferencias, la de Rowland y la del deflector, son tangentes entre sí en la posición del deflector donde el deflector 25

ha radiado la mitad de la potencia total radiada. La guía de película se corta siguiendo la circunferencia de Rowland en el entorno de los puntos focales de las longitudes de onda centrales de los canales. En el límite de este corte se colocan tantas guías de canal adecuadamente dimensionadas y orientadas

5 como canales tiene o va a tener el demultiplexor. La posición exacta y separación de estas guías vendrán dadas por las longitudes de onda centrales de los canales del demultiplexor, su ancho de banda y el nivel de diafonía entre canales adyacentes que se puede tolerar. Mientras que su orientación viene impuesta por la dirección en la cual el haz generado por el deflector se propaga

10 dentro de la guiaonda de película  $\theta$

En la realización de este demultiplexor es crucial poder conformar tanto la amplitud como la fase del haz difractado por el deflector de haz único pues de ello depende la calidad con la cual se separan las diferentes longitudes de onda. Un haz no conformado, es decir el que produciría un deflector perfectamente periódico, produciría un haz de tipo exponencial con fase lineal, este tipo de haz introduciría importantes pérdidas de inserción ya que la luz en el foco no tendrá la forma del modo de la guía receptora y además la fase lineal cuando el ángulo de radiación está alejado de la vertical daría lugar a la aparición de lóbulos secundarios en la luz enfocada que introducirían interferencias indeseadas en las guías receptoras adyacentes.

El uso, dentro de la geometría descrita, de un deflector de haz único en el que la dirección del haz generado puede ser ajustada dinámicamente mediante una señal de control que actúa sobre un modulador (segundo aspecto de la invención) permite sintonizar fácilmente los canales del demultiplexor en longitud de onda. En esta configuración, el deflector ajustable se encuentra también sobre una geometría que enfoca (típicamente una circunferencia), por lo que, al actuar sobre la señal de control del modulador, se modifica localmente

25 la dirección con la que se emite el haz difractado lo que permite ajustar el enfoque del haz sobre las guías de salida. En el caso más sencillo, en el que un único modulador se dispone de forma homogénea a lo largo de todo el

30

deflector, la aplicación de la señal de control introduce un cambio de índice de refracción efectivo que es constante a lo largo del deflector  $\Delta n_B(z) = \Delta n_B = cte$  lo que provoca una variación del ángulo con el que el haz difractado es desviado  $\Delta\theta$  que es también constante a lo largo de todo el deflector, lo que a su vez provoca que el punto de enfoque siga una trayectoria a lo largo de la circunferencia de Rowland cuya longitud de arco es aproximadamente igual a  $\frac{R}{n_s \cos(\theta)} \Delta n_B$ . Debe destacarse que debido a que la trayectoria que sigue el punto de enfoque al variar la longitud de onda coincide con la trayectoria que se produce al actuar sobre la señal de control del deflector, es posible utilizar esta señal de control para sintonizar el demultiplexor en longitud de onda, lo que permite alinear fácilmente la posición en longitud de onda de los canales del demultiplexor a una rejilla preestablecida. Al permitir de una manera sencilla el alineamiento dinámico de los canales, esta propiedad permite compensar fácilmente el desalineamiento de los canales que típicamente se producen debido a errores de fabricación, en los demultiplexores en tecnología de silicio.

Debido al principio de reciprocidad del electromagnetismo toda la funcionalidad del dispositivo como demultiplexor (una entrada y varias salidas) es directamente trasladable a su operación como multiplexor, es decir, cuando el papel de las entradas y salidas se invierte. En esta configuración las guías de salida se utilizan para introducir varios canales con información en diferentes longitudes de onda y la señal combinada, con la información multiplexada de todos los canales de entrada, es extraída a través de la guiaonda de entrada.

Un aspecto de la invención asociado al tercer aspecto de la invención se refiere a un método que comprende: proporcionar un multiplexor/demultiplexor de longitudes de onda; e introducir al menos una señal óptica con una longitud de onda y polarización de trabajo en el multiplexor/demultiplexor; en el que el multiplexor/demultiplexor comprende: un deflector lateral de haz único de acuerdo con el primer aspecto de la invención (según la primera configuración antes descrita y/o la segunda configuración antes descrita); un soporte curvo sobre el que se dispone el deflector para generar un haz que se enfoca dentro

- de la guiaonda de película de destino del deflector; y una pluralidad de guiaondas de canal receptoras situadas en puntos de la guiaonda de película de destino en los cuales el haz difractado se enfoca para diferentes longitudes de onda, de manera que al cambiar la longitud de onda de trabajo el haz se
- 5 enfoca predominantemente en una de las guiaondas receptoras capturando la luz. Realizaciones descritas con relación al tercer aspecto de la invención son igualmente aplicables a este aspecto de la invención asociado a dicho tercer aspecto de la invención.
- 10 Un cuarto aspecto de la invención es un alimentador de antenas ópticas basado en deflector lateral de haz único (primer aspecto de la invención) o en un deflector lateral de haz único cuyo haz generado puede ser ajustado dinámicamente en dirección (segundo aspecto de la invención). En esta configuración el deflector de haz único se utiliza para convertir el modo de la
- 15 guía de canal en un haz ancho que se propaga por la guía de película. Las particularidades del deflector de haz único permiten realizar una conversión desde un modo muy confinado (el modo de la guía de canal) a un haz muy ancho en un espacio reducido y sin introducir pérdidas significativas. Además, la dirección de este haz puede ser ajustada dinámicamente, y de forma
- 20 independiente de la longitud de onda de operación haciendo uso del segundo aspecto de la invención, lo que permite controlar el ángulo de propagación del haz en el plano del chip. El haz generado por el deflector lateral de haz único se propaga por la guía de película y se hace incidir sobre una rejilla de difracción igualmente ancha que actúa como antena óptica difractando la luz fuera del
- 25 plano del chip. La fuerza de la rejilla de difracción puede ser ajustada y/o apodizada ('apodized'), mediante cualquiera de las opciones existentes en el estado de la técnica) para ajustarlo a la longitud que se desea que tenga el haz en la dirección en la que el haz se propaga por la rejilla.
- 30 La arquitectura de esta invención permite tener dos grados de libertad para ajustar el azimut (ángulo en el plano del chip) y la elevación (ángulo respecto a la normal del chip) simultáneamente. Actuando sobre el modulador que actúa

sobre la guía de canal, es posible ajustar dinámicamente la dirección del haz generado por el deflector, lo que varía el ángulo con el que dicho haz incide sobre la rejilla de difracción que actúa como antena óptica. De esta forma es posible ajustar el azimut del haz radiado por la antena. Así mismo, debido a las

5       características dispersivas del deflector de haz único y de la rejilla de difracción que actúa como antena óptica, es posible cambiar la elevación del haz radiado por la rejilla de difracción actuando sobre la longitud de onda a la que es operado el dispositivo. La modificación de la longitud de onda de la luz provoca una variación simultánea del azimut (debido a la dispersión del deflector de haz

10      único) y de la elevación (debido a la dispersión de la rejilla de difracción usada como antena óptica) del haz radiado.

Por tanto este cuarto aspecto de la invención, en el cual un deflector de haz único se usa como alimentador de una rejilla de difracción que actúa como

15      antena óptica, permite generar de forma eficiente haces radiados cuya anchura sea del orden de los cientos de micrómetros incluso llegando a unos pocos milímetros (y si se utilizan rejillas de difracción débiles, el largo de estos haces ópticas podrían alcanzar de igual manera los pocos milímetros) y controlar su dirección de radiación tanto en azimut como en elevación de forma sencilla

20      mediante: i) la señal de control del modulador que actúa sobre la guía de canal y ii) la longitud de onda de operación del dispositivo.

Un aspecto de la invención asociado al cuarto aspecto de la invención se refiere a un método que comprende: proporcionar un dispositivo alimentador de antena óptica; e introducir al menos una señal óptica con una longitud de onda y polarización de trabajo en el dispositivo alimentador; en el que el dispositivo alimentador comprende: un deflector lateral de haz único de acuerdo con el primer aspecto de la invención (según la primera configuración antes descrita y/o la segunda configuración antes descrita); y una rejilla de difracción grabada

25      sobre la guiaonda de película de destino del deflector; en el que el deflector y la rejilla de difracción están dispuestos para que un haz generado incida sobre la rejilla de difracción. Realizaciones descritas con relación al cuarto aspecto

30

de la invención son igualmente aplicables a este aspecto de la invención asociado a dicho cuarto aspecto de la invención.

### **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

5

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

10

Fig. 1.- Esquema de una primera configuración del deflector de haz único que difracta la luz desde una guiaonda de canal periódica de índice de refracción efectivo  $n_B$  hacia una guiaonda de película de índice de refracción efectivo  $n_s$  inferior a  $n_B$ .

15

Fig. 2.- Muestra de forma esquemática un deflector perfectamente periódico en el que la guiaonda de película se ha implementado mediante una estructura periódica sub-longitud de onda.

20

Fig. 3.- La figura muestra de manera gráfica la condición de phase-matching en el supuesto de que se cumpla la condición de haz único y halla un solo haz radiado dentro de la guiaonda de película. La flecha saliente del origen de coordenadas indica la dirección de propagación dentro de la guiaonda de película.

25

Fig. 4.- La figura muestra de manera gráfica la condición de phase-matching en el supuesto de que no se cumpla la condición de haz único y halla varios haces radiados: uno en la guía de película, otro en el medio de sustrato y otro en el medio de cubierta. La flecha saliente del origen de coordenadas indica la dirección de propagación dentro de la guiaonda de película.

Fig. 5.- Esquema de una segunda configuración del deflector de haz único que

difracta la luz desde una guiaonda de canal periódica de índice de refracción efectivo  $n_B$  hacia una guiaonda de película de destino de índice de refracción efectivo  $n_s$  superior a  $n_B$ . Para ello se ayuda de una guiaonda de película auxiliar y un adaptador modal.

5

Fig. 6.- Muestra una posible implementación basada en el uso de metamateriales SWG, en tecnología de silicio sobre aislante, de la segunda configuración del deflector de haz único que difracta la luz desde una guiaonda de canal periódica de índice de refracción efectivo  $n_B$  hacia una guiaonda de película de índice de refracción efectivo  $n_s$  superior a  $n_B$  a través de una guiaonda de película auxiliar y un adaptador modal.

Fig. 7.- Muestra un expensor de haz completo basado en la concatenación de una pluralidad de secciones de deflectores de haz único en la que la geometría de cada sección se va modificando lentamente a lo largo del dispositivo para conformar la amplitud o la fase de la onda difractada, manteniéndose la condición de radiación de haz único en cada sección. El dispositivo consta de dos guías de canal estándar para entrada y salida, un adaptador modal adiabático entre las guías de canal de entrada y salida las secciones inicial y final del deflector de haz único, una pluralidad de secciones deflectoras de haz único cuya geometría de la guía de canal varía a lo largo de la estructura, una guía de película auxiliar implementada mediante estructuras sub-longitud de onda, una estructura de adaptación modal implementada con estructuras sub-longitud de onda y una guía de película de destino realizada de material silicio.

25

Fig. 8.- Muestra la amplitud del perfil de campo que se desea implementar  $|g(z)|$  y la fuerza de radiación  $\alpha(z)$  necesaria para obtenerlo si se asume que un 0.5% de la potencia entrante no es radiada y se transmite al final del deflector.

30

Fig. 9.- Muestra las curvas de diseño del patrón sinusoidal necesario para conseguir el haz deseado. Las curvas han sido obtenidas mediante análisis

modal Floquet. a) Fuerza de radiación  $\alpha$  en función de la profundidad de modulación  $D_g$ . b) Índice de refracción efectivo del modo fundamental Floquet-Bloch en función de la profundidad de modulación  $D_g$ .

5 Fig. 10. Variación a lo largo del deflector del patrón geométrico sinusoidal (como el mostrado en la Fig. 6) necesario para implementar el campo que se muestra en la Fig. 8.

10 Fig. 11.- Simulación 3D FDTD del dispositivo completo. a) Perfil de campo magnético en un corte trasversal (plano XY) en mitad del deflector que muestra como la luz se redirecciona de la guía de canal a la guía de película SWG. b) Propagación del campo magnético en el plano XZ a el grosor media de la guía de canal. c) Comparación del campo magnético de la simulación FDTD 3D  $g_{FDTD}(z)$  a lo largo de la línea discontinua mostrada en la Fig. 11(b) y el campo objetivo  $g(z)$  mostrado en la Fig. 8.

15 Fig. 12.- Muestra un expansor de haz basado en un deflector de haz único cuyo ángulo del haz  $\theta$  es controlado eléctricamente por una señal  $V$  mediante un modulador termo-óptico (calentador) colocado sobre la guiaonda de canal. a) Vista en perspectiva. b) Corte a lo largo del plano  $\Gamma$  tal y como se muestra en a).

20 Fig. 13.- Geometría del demultiplexor basado en un deflector de haz único situado sobre una circunferencia en una configuración que enfoca el haz. El haz difractado por el deflector dentro de la guiaonda de película de silicio ha sido diseñado para que la imagen que se forma sobre la circunferencia de Rowland sea de igual tamaño y características al modo fundamental de las guías receptoras. De forma ilustrativa, se muestra como ejemplo, como tres longitudes de onda distintas se enfocan en guías distintas produciendo el efecto 25 de demultiplexación en longitud de onda.

30 Fig. 14.- Transmisión desde la guía de entrada a 5 guías de salida de un

demultiplexor de longitudes de onda basado en un deflector de haz único. El demultiplexor consta de 5 canales separados 10 nm en torno a la longitud de onda 1550 nm.

- 5 Fig. 15.- Transmisión desde la guía de entrada a 5 guías de salida de un demultiplexor de longitudes de onda basado en un deflector de haz único. El demultiplexor consta de 5 canales separados 10 nm en torno a la longitud de onda 1550 nm. Se muestra la transmisión cuando no se aplica una señal de control sobre el modulador termo-óptico (y por tanto la guía de canal está a 10 temperatura ambiente  $T_0$ ) y cuando debido a la aplicación de una señal de control sobre el modulador termo-óptico se produce un calentamiento de la guía de canal de 60 K por encima de la temperatura ambiente.

- 15 Fig. 16.- a) Esquema simplificado de una antena óptica alimentada por un deflector lateral de haz único. b) Variación de la dirección en la que la antena radia el haz con la longitud de onda (línea discontinua) y con la temperatura (mapa de color).

#### **REALIZACIONES PREFERENTES DE LA INVENCIÓN**

- 20 A continuación, con ayuda de las figuras 1 a 16, se describen varias realizaciones preferentes de los aspectos de la invención.

#### **Deflector lateral de haz único**

- 25 La figura 1 muestra de forma esquemática una primera configuración de la parte esencial un deflector de haz único perfectamente periódico que es capaz de realizar la transferencia de potencia de una guía de canal a una guía de película de índice de refracción efectivo menor que la guía de canal. Este deflector está formado por una guía de canal (100) que tiene una perturbación periódica de 30 periodo  $\Lambda$ , una guiaonda de película de destino (101), un sustrato (102) sobre el que se apoyan ambas guiaondas y una cubierta que las cubre (la cubierta no se muestra en la figura 1 para mayor claridad). La guiaonda de canal y la

guiaonda de película pueden estar formados por materiales diferentes y/o tener grosores distintos ( $H_1 \neq H_2$ ). La guiaonda de canal y la guiaonda de película pueden estar separadas una distancia  $S$  o estar pegadas ( $S = 0$ ). El índice de refracción efectivo de la guía de canal y la guía de película son, 5 respectivamente  $n_B$  y  $n_s$  cumpliéndose la condición de que el índice de la guía de película es menor que el índice de la guía de canal, es decir,  $n_s < n_B$

La figura 2 muestra una realización de la parte esencial de la primera configuración del deflector descrito en la figura 1 sobre tecnología de silicio 10 sobre aislante (Silicon on Insulator) de 220 nm en la cual la guía de película (101) se realiza mediante un material SWG cuyo ciclo de trabajo DC ha sido seleccionado para sintetizar el índice de refracción efectivo deseado. En esta realización específica el espaciado 's' ha sido escogido igual a cero y los grosores de las guías  $H_1$  y  $H_2$  son iguales entre si e iguales al grosor del silicio 15 de la oblea. La primera configuración del deflector de haz único comprende:

- una guiaonda de canal en la que ha sido grabado con una perturbación lateral periódica de periodo  $\Lambda$  que de forma no limitativa ha sido elegida de tipo sinusoidal (100),
- una guiaonda de película implementada mediante un metamaterial sub-longitud de onda SWG (101) consistente en la intercalación de bloques de silicio (301) y huecos de dióxido de silicio (302) a lo largo de la dirección de propagación. Este medio SWG está caracterizado por su periodo  $\Lambda_{SWG}$  y su ciclo de trabajo DC.

25

Se ha usado para esta realización preferente, a modo ilustrativo, una oblea con una capa de silicio de 220 nm de grosor. Que está colocada sobre 2  $\mu m$  de dióxido de silicio embebido (Buried Oxide, BOX) (102) y está protegida por arriba por otras 2  $\mu m$  de dióxido de silicio que se deposita sobre la capa de 30 silicio después de definir los dispositivos.

La anchura nominal de la guiaonda de canal  $W_g$  se ha fijado a 600 nm para

conseguir un buen confinamiento en la guiaonda de canal. Sobre esta se superpone una modulación sinusoidal periódica de la anchura con un periodo  $\Lambda$  y una profundidad de modulación gobernada mediante el parámetro  $D_g$ . Con esta geometría el modo Floquet fundamental tiene un índice de refracción efectivo  $n_B$  de aproximadamente 2.6.

Los dos parámetros que definen el metamaterial SWG (el periodo  $\Lambda_{SWG}$  y el ciclo de trabajo DC) se deben diseñar para asegurar que en todo el ancho de banda de interés se cumpla la condición de haz único (7) que se ilustra en la figura 3. En esta realización preferente se ha fijado  $\Lambda_{SWG}$  a 200 nm y DC a 0.5. Con esta geometría la guía de película SWG se comporta como un metamaterial anisótropo que presenta un índice de refracción efectivo que depende de la dirección de propagación dentro de ella. Más concretamente, como se muestra en las figuras 3 y 4, el diagrama de dispersión, que muestra el lugar geométrico de los vectores de onda permitidos dentro de esta guiaonda de película SWG, es una elipse plana (402) en el diagrama de los vectores de onda normalizados,  $\vec{k}/k_0$ . En particular, en esta elipse, el semieje mayor está alineado con el eje z y mide  $n_s^{\parallel} \approx 2.2$  y el semieje menor está alineado con el eje x y mide  $n_s^{\perp} \approx 1.8$ . Para ilustrar la condición de radiación de haz único, esencia de la invención, en las figuras 3 y 4 se muestra también el diagrama de dispersión del material de cubierta o ‘cladding’ (no mostrado en la figura 2) y sustrato (102) que rodean a las guiaondas de canal y de película. Este es una esfera (404) de radio igual al índice del óxido de silicio  $n_{SiO_2}$ . En estas figuras se muestra también como un punto en el eje  $k_z/k_0$  el valor del índice de refracción efectivo Bloch-Floquet  $n_B$  y el plano (406)  $n_z = n_B - \lambda/\Lambda$  que muestra la condición de ‘momentum matching’ que debe cumplir el orden de difracción -1.

Tal y como se indica en la figura 3, el periodo  $\Lambda$  del deflector lateral de haz único se debe seleccionar para cumplir la condición de haz único descrita por la expresión (7). Se debe recordar que en este caso esta condición no es aplicable directamente pues la guía de película a la que se acopla o se va a acoplar la

luz está compuesta por un metamaterial SWG qué es anisótropo y por tanto el índice de refracción efectivo de esta guiaonda depende de la dirección de propagación del haz dentro de esta. Por ello, y tal como indica la expresión (9) se ha de usar como  $n_s$  la máxima proyección del vector de onda normalizado sobre el eje de propagación. En este caso, esto corresponde con  $n_s = n_s^{\parallel} \approx 2.2$ . Con todo esto, se tiene que el periodo deberá seleccionarse en el rango:

$$\left( \frac{\lambda_0}{n_s + n_B}, \frac{\lambda_0}{n_a + n_B} \right) = (323 \text{ nm}, 384 \text{ nm}) \quad (13)$$

Como periodo nominal se ha escogido  $\Lambda = 360 \text{ nm}$ , que es un valor intermedio del intervalo. Esta situación, en la que se cumple la condición de haz único, se representa en el diagrama de dispersión de la figura 3 donde se observa que el plano que define el orden de difracción -1 (406) no interseca con la esfera (404) que caracteriza la propagación en el óxido de silicio, frustrando por tanto el escape de potencia hacia el 'cladding' y sustrato. Sin embargo, el plano (406) sí que corta a la elipse (402) que caracteriza el diagrama de dispersión en la guía de película y lo hace en un único punto que define la dirección de propagación, indicada por el vector (408), en la que se propaga el haz único por la guía de película.

- De forma equivalente, la expresión (13) puede expresarse en función del ángulo  $\theta$  con el cual se propaga el haz difractado dentro de la guiaonda de silicio. En este caso, la condición equivalente sería que el haz difractado debe propagarse dentro de la guiaonda de película de silicio con un ángulo  $\theta$  con respecto a la dirección perpendicular a la dirección de propagación y contenida en el plano de la guiaonda de película que en valor absoluto es mayor a  $30^\circ$ , es decir  $|\theta| > 30^\circ$ . Esto lo aleja notablemente de la difracción cerca de la dirección normal a la de propagación dentro de la guiaonda de canal ( $\theta = 0^\circ$ ) como se ha usado hasta la fecha en dispositivos deflectores.
- De forma ilustrativa, en la figura 4 se muestra una hipotética situación en la que

- no se cumple la condición de haz único (7) debido a que el factor  $\lambda/\Lambda$  no ha sido diseñado adecuadamente. En este caso, el plano (406) no solo interseca la elipse en un punto (que determina la dirección de propagación en la guía de película auxiliar) sino que también interseca la esfera formando un círculo (410)
- 5 que muestra que es posible la radiación de potencia hacia el 'cladding' y sustrato en cualquier dirección que indica dicho círculo (410). Para reivindicar la novedad de la propuesta inventiva es preciso hacer notar que los diseños existentes previamente en el estado de la técnica presentaban configuraciones como la mostrada en esta figura 4 y, por tanto, perdían parte de la potencia
- 10 luminosa en forma de radiación fuera del plano del chip, lo que incrementaba sus pérdidas de inserción. Por el contrario, la invención propuesta hace uso de un diseño como el mostrado en la figura 3 en la que se produce la condición de radiación de haz único.
- 15 La figura 5 muestra una segunda configuración de la parte esencial del deflector de haz único correspondiente a una situación en la que la guiaonda de película de destino (101) tenga un índice de refracción efectivo  $n_s$  superior al índice de refracción efectivo  $n_B$  que presenta la guiaonda de canal (100). En esta configuración, para posibilitar la condición de haz único definida por la expresión (7) se debe intercalar una nueva guiaonda de película auxiliar (105) 20 cuyo índice de refracción efectivo  $n_{aux}$  sea menor que el de la guiaonda de película. Esta guiaonda deberá tener la longitud  $W_{aux}$  suficiente para asegurar que el orden de difracción 0 tiene un acople despreciable. Además, para optimizar la transmisión de potencia entre la guiaonda auxiliar (105) y la guiaonda de película de destino (101) se puede intercalar entre ellas una 25 estructura de adaptación modal (106) de anchura  $W_{adapt}$ . Esta estructura de adaptación puede implementarse preferentemente mediante una transición de índice de refracción gradual o '*Graded Index*' (GRIN).
- 30 La figura 6 muestra una realización preferente en tecnología de silicio sobre aislante de la parte esencial de la segunda configuración del deflector de haz único, correspondiente al caso de que la guiaonda de película de destino (101)

tenga un índice de refracción efectivo  $n_s$  superior al índice de refracción efectivo de la guía de canal  $n_B$ . En esta realización preferente la guía auxiliar (105) y la estructura de adaptación modal (106) se realizan mediante metamateriales SWG. Esta segunda configuración de la parte esencial del deflector de haz

5 único comprende:

- una guiaonda de canal en la que ha sido grabado con una perturbación lateral periódica de periodo  $\Lambda$  que de forma no limitativa ha sido elegida de tipo sinusoidal (100),
- una guiaonda de película auxiliar implementada mediante un metamaterial sub-longitud de onda SWG consistente en la intercalación de bloques de silicio (301) y huecos de dióxido de silicio (302) a lo largo de la dirección de propagación, Este medio SWG está caracterizado por su periodo  $\Lambda_{SWG}$  su ciclo de trabajo DC. y su anchura  $W_{SWG}$ ,
- una estructura de adaptación modal implementada mediante una estructura SWG que sintetiza un índice de refracción gradual (106) y que tiene una anchura  $W_{Adapt}$ ,
- una guiaonda de película de destino de silicio (101),

El diseño de la periodicidad de la guía de canal  $\Lambda$ , y del periodo  $\Lambda_{SWG}$  y ciclo de trabajo DC de la guía auxiliar se hacen con idénticas consideraciones a las realizadas en la descripción de la primera configuración del deflector de haz único (figuras 1, 2, 3 y 4), siendo el objetivo fundamental de diseño conseguir la condición de difracción de haz único. Adicionalmente, la anchura de la guiaonda de película intermedia SWG (101)  $W_{SWG}$  se debe fijar de forma que el acople de potencia del orden 0 hacia la guiaonda de película de destino (101) sea despreciable. Una vez más esto se puede hacer mediante simulación fotónica por análisis modal Floquet-Bloch. Para ello se deberá analizar la estructura sin perturbar y fijar esta anchura a un valor que consigue que la constante de atenuación sea tal que en la longitud total del dispositivo la fracción de potencia acoplada a la guiaonda de película de destino por el orden 0 sea menor que un valor predeterminado. En este ejemplo de realización se ha usado fijado  $W_{SWG}$  a  $3 \mu m$  para conseguir que un deflector de longitud

100  $\mu m$  (dos veces el diámetro modal objetivo) filtre hacia la guiaonda de película de destino menos del 0.1% de la potencia entrante.

- La anchura de la zona de adaptación de índice de refracción gradual (106),
- 5     *W<sub>Adapt</sub>*, debe ser lo suficientemente grande para que la transmisión de potencia de la guiaonda de película auxiliar SWG a la guiaonda de película de destino no produzca excesivas perdidas por radiación fuera del plano de la oblea o reflexión. El diseño de este parámetro hacer de manera inmediata mediante simulación fotónica de un solo periodo de la zona de índice de refracción gradual con un simulador FDTD que soporte condiciones de frontera de tipo periódico. Así, se ha visto que para un valor de *W<sub>Adapt</sub>* de 2  $\mu m$  la transmisión de la guiaonda de película SWG a la guiaonda de película de destino es prácticamente sin perdidas (>0.1 dB).
- 10     La figura 7 muestra una representación esquemática de una realización preferente del sistema completo primer aspecto de la invención: el deflector de haz único. Esta realización preferente está realizada en tecnología de silicio sobre aislante para luz polarizada en el plano del chip, (denominada habitualmente polarización transversal eléctrica TE) a la longitud de onda de 1550 nm y utiliza como guía auxiliar una guía de metamaterial SWG. Este deflector transforma el modo fundamental de una guiaonda de canal de la plataforma de silicio sobre aislante de 500 nm (610) en un haz de ~60  $\mu m$  de anchura (611) guiado por la guía de película de destino (101). Este dispositivo incluye, adicionalmente a la parte esencial del adaptador de haz único descrito 20 anteriormente, dos secciones de adaptación de entrada y salida (604) para adaptar el modo de la guía de canal simétrica 'Silicon wire', típicamente usada en fotónica de silicio (601), al modo de una guía de canal asimétrica (100) que aparece en la parte esencial del expansor de haz de único descrito en las figuras 1, 2, 5 y 6.
- 25     El sistema deflector de haz único completo comprende:

- dos guiaondas de canal convencionales tipo 'Silicon wire' que

- implementan la entrada (601) y una de las salidas (602)
- dos conversores modales colocados al inicio (604) y al final (604) del deflector que adaptan la geometría de la guiaonda de canal de tipo "Silicon Wire" a la geometría de la parte esencial del deflector de haz único
  - una guiaonda de canal que ha sido grabada con un patrón de tipo sinusoidal apodizado (100) cuya profundidad  $D_g(z)$  y periodo  $\Lambda(z)$  de modulación se modifican a lo largo del dispositivo,
  - una guiaonda de película auxiliar (105) implementada mediante un metamaterial sub-longitud de onda SWG consistente en la intercalación de bloques de silicio y huecos de dióxido de silicio a lo largo de la dirección de propagación,
  - una estructura de adaptación modal implementada mediante una estructura SWG que sintetiza un índice de refracción gradual (106),
  - una guiaonda de película de destino (101) que constituye la salida hacia donde se desvía el haz único generado,

El adaptador modal a la entrada y salida 604 introduce de manera progresiva a lo largo de la dirección el metamaterial SWG que forma la guiaonda de película. Para ello, se van introduciendo bloques de silicio del mismo grosor y periodicidad que los que componen la guiaonda de película SWG, siempre pegados a la guiaonda de canal por el lado de la guiaonda de película SWG, cuya anchura varíe de manera que al inicio sea nula y al final sea igual a la anchura de la guiaonda de película SWG. Hay que notar que la variación de la anchura a lo largo del adaptador puede seguir cualquier tipo de función mientras se haga de forma monótona y suave para asegurar la adiabaticidad. En esta realización preferente se ha usado una variación de tipo lineal por simplicidad. La longitud de esta transición se ha fijado a 22  $\mu\text{m}$  para maximizar la transferencia al modo Floquet-Bloch fundamental del deflector.

30

La variación de grabado  $D_g(z)$  define la fuerza de radiación  $\alpha(z)$  y esta a su vez es la que define la forma que tendrá la magnitud del campo radiado. Por

tanto, para conseguir un determinado perfil campo radiado  $|E_r(z)|$  se deberán diseñar la profundidad de grabado para sintetizar la fuerza de radiación necesaria que viene determinada por la expresión (8). En esta realización preferente el campo radiado objetivo es una Gaussiana con una anchura de 5 cintura o *mode field diameter* (MFD) de  $50 \mu m$ , es decir

$$|g(z)| = A_0 \cdot \exp\left(-\left(\frac{z}{MFD/2}\right)^2\right), \quad (14)$$

En la Fig. 8 se muestra la forma que tiene este campo radiado y la variación de fuerza de radiación que consigue ese campo radiado cuando se permite que un 0.5% de la potencia entrante no sea radiada y se tramita hasta la guía de salida de tipo *silicon wire* (602).

10

Para encontrar la variación de profundidad de modulación  $D_g(z)$  que permite implementar dicho campo, se ha realizado el análisis modal Floquet-Bloch de un periodo para diferentes profundidades de modulación  $D_g$  en el rango (0,0.7) y se ha obtenido tanto la variación de índice de refracción efectivo (Fig. 9) como

15

la variación en la fuerza de radiación que sufre el modo Floquet-Bloch. Así, con esta variación y conocida la variación con la dirección de propagación (z) que debe tener la fuerza de radiación que se requiere para implementar el campo radiado objetivo (Fig. 8) se puede diseñar la variación de profundidad de modulación  $D_g(z)$  que se muestra en Fig. 10. En esta figura, también se

20

muestra la variación de periodo que se debe implementar para asegurar que todos los elementos radian en la misma dirección. Esto es necesario ya que el índice de refracción efectivo de modo fundamental Floquet-Bloch varía ligeramente con la profundidad de modulación  $D_g$ . Para compensar esta variación de índice de refracción efectivo  $\Delta n_B$  se debe introducir una variación 25 en el periodo  $\Delta \Lambda$  dada por:

$$\Delta \Lambda = -\frac{\Lambda^2}{\lambda_0} \Delta n_B. \quad (15)$$

La figura 11 muestra el perfil de campo que se obtiene cuando el expansor de haz diseñado se analiza mediante un simulador vectorial 3D FDTD. Se observa

claramente que el campo se dirige desde el núcleo de la guiaonda de canal hacia la guiaonda de película SWG y más tarde es transferido a la guiaonda de película de destino. Asimismo, también se observa como el campo radiado tiene una forma bastante parecida al campo que se definió como objetivo.

5

### **Deflector de haz único controlable dinámicamente**

La figura 12 muestra una realización preferente del segundo aspecto de la invención, un deflector de haz único cuya dirección del haz difractado puede

10 ser ajustado dinámicamente mediante uso de un modulador de fase sobre la guía de canal del deflector. Específicamente, pero de forma no limitativa, esta realización preferente se basa en el uso de moduladores termo-ópticos como los existentes en el estado de la técnica. La figura 12.a muestra el esquema general de la invención sobre una tecnología de silicio sobre aislante, que  
15 consta de un deflector de haz único (similar al descrito en la figura 7) sobre el que se ha superpuesto una tira de un material conductor resistivo (típicamente Ti o una aleación de Ti y W). Dicha tira puede ser alimentada eléctricamente mediante una corriente que, por efecto Joule produce un calentamiento del entorno que la circunda. Al ser la geometría de la tira invariante con la dirección  
20 de propagación (z) la aplicación de una señal de control (V) provocará un calentamiento uniforme a lo largo del dispositivo. El calentamiento del material óptico genera una pequeña variación del índice de refracción efectivo del material de silicio que constituye el núcleo de la guía de canal del deflector lo que a su vez provoca una variación del índice de refracción efectivo del modo  
25 Floquet-Bloch que se propaga por la estructura. Esta variación del índice del modo, que en este caso y de forma no limitativa, se ha supuesto homogénea a lo largo de toda la longitud del deflector, provoca la variación del ángulo de difracción del haz. De esta forma, actuando sobre la corriente eléctrica que circula por el calentador es posible modificar la potencia eléctrica disipada y,  
30 por tanto, modificar el ángulo de flexión del haz generado en la guía de película.

- La figura 12.b muestra un corte transversal de la estructura. La altura a la que se sitúa la tira conductora debe elegirse como un compromiso entre: aumentar la eficiencia de calentamiento, lo que requiere una distancia pequeña entre la tira conductora y el núcleo de la guía de canal y evitar las pérdidas ópticas por
- 5 interacción del campo óptico con la guía, lo que requiere una distancia grande entre la tira conductora y el núcleo de silicio de la guía. Una distancia entre la tira calentadora y el núcleo de silicio de la guía de  $2 \mu m$  proporciona una buena solución de ingeniería en esta realización preferente específica.
- 10 Utilizando una tecnología de calentadores típicos de (TiW) con una anchura de 4 micras, situados a  $2 \mu m$  sobre la guía es posible calcular mediante simulaciones térmicas que la energía eléctrica requerida para elevar un grado un grado K cada  $\mu m$  del núcleo de la guía de canal es aproximadamente  $\sigma_{TH} = 10 \frac{\mu W}{\mu m \cdot K}$ , es decir, que es necesaria una potencia eléctrica  $10 \mu W$  para calentar
- 15 un grado K cada  $\mu m$  del núcleo de la guía de canal. Teniendo en cuenta que la longitud del dispositivo total para esta realización específica es de aproximadamente  $L = 160 \mu m$ , que el coeficiente térmico-óptico del silicio es  $\frac{dn_{si}}{dT} = 1.86 \cdot 10^{-4} (RIU/K)$  y que es posible aproximar la variación térmica del índice de refracción efectivo del modo por la del silicio  $\frac{dn_{si}}{dT} = \frac{dn_B}{dT}$ , es posible
- 20 estimar la potencia eléctrica necesaria para variar el índice de refracción del modo guiado como

$$\frac{dP_e}{dn_B} = \frac{\sigma_{TH} L}{\frac{dn_{si}}{dT}} = 8.6 \cdot 10^6 \frac{\mu W}{RIU} \quad (16)$$

Finalmente, la eficiencia de escaneo angular con la potencia eléctrica puede calcularse aplicando la conocida regla de la cadena

$$\frac{d\theta}{dP_e} = \frac{d\theta}{dn_B} \frac{dn_B}{dP_e} \quad (17)$$

25

y teniendo en cuenta la ecuación (11) para el caso específico de este diseño, obteniéndose para este caso una eficiencia de escaneo aproximada de

$$\frac{d\theta}{dP_e} = 2.86 \cdot 10^{-3} \text{ grados/mW} \quad (18)$$

Lo que muestra que el deflector de haz único permite modificar eficazmente el ángulo del haz difractado en el plano del 'chip' con una eficiencia de  $2.86 \cdot 10^{-3}$  grados por cada  $mW$  de potencia eléctrica consumida para un haz de gran

5 ancho transversal.

### **Multiplexor/demultiplexor de longitudes de onda basado en un deflector de haz único**

10 La figura 13 muestra de forma esquemática una realización preferente de un demultiplexor formado por un deflector de haz único (1202) que se dispone siguiendo un círculo (1204) de radio  $R$ . Preferentemente, el dispositivo se implementa en la plataforma de silicio sobre aislante con una capa de silicio de 220 nm de grosor colocada sobre un sustrato de dióxido de silicio y cubierta por 15 una cubierta de dióxido de silicio. En la figura 13 se muestran en negro las regiones que no están grabadas, es decir, las regiones donde hay una capa de silicio de 220nm, y en blanco las regiones en las que se ha eliminado la capa de silicio. El haz radiado por el deflector (1202) se transmite, a través de una guiaonda de película auxiliar SWG y un adaptador de índice de refracción 20 gradual, a una guía onda de película de destino de material silicio. Dentro de la guiaonda de película de destino, el haz radiado se enfoca a medida que se propaga. Además, el punto focal se varía con la longitud de onda de la luz entrante al dispositivo. Esto es lo que permite separar las diferentes longitudes de onda. Los puntos focales para las distintas longitudes de onda se sitúan 25 sobre la circunferencia de Rowland (1203). La circunferencia de Rowland es una circunferencia que: 1) tiene de radio  $R/2$ , la mitad del radio  $R$  del círculo sobre el que se coloca el deflector, 2) está en el interior del círculo sobre el que se coloca el deflector y 3) estos dos círculos, el círculo de Rowland y el círculo del deflector, son tangentes entre sí en la posición del deflector donde el 30 deflector ha radiado la mitad de la potencia total radiada.

En esta realización preferente se ha establecido como objetivo para el demultiplexor que tenga 5 canales, separados 10 nm y centrados en torno a la longitud de onda de 1550 nm. También, se quiere que la diafonía en entre 5 canales adyacentes sea menor a -25 dB. Las señales de entrada y salida usarán la polarización transversal eléctrica (TE).

El arco que ocupa el grating se ha fijado a  $\phi_G = 0.3\pi$  rad. Por otro, el haz radiado por el deflector se fija a una Gaussiana enventanada. La semi-anchura 10 de esta gaussiana  $MFR_G$  se fija a un cuarto de la longitud total del deflector  $MFR_G = \phi_G \cdot R/4$ . Es decir, sobre la curva del deflector la magnitud del campo viene dada por  $g(s) = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{s^2}{MFR_G}\right)$ . Este campo difractado dará lugar en el punto a focal a otra Gaussiana con una semi-anchura  $MFR_\xi$  de  $0.74 \mu m$  que requiere de una guía de  $2.1 \mu m$  de ancho para capturarla eficazmente. Por esta 15 razón, se ha fijado la anchura de las guiaondas de canal receptoras a  $2.1 \mu m$ .

Para asegurar el nivel de diafonía deseado ( $< -25$  dB) las guiaondas receptoras se colocan sobre la circunferencia de Rowland separadas  $W_s = 2.8 \mu m$ . Esta separación y el radio del circulo sobre el que se coloca el deflector 20 fijan la separación entre canales del demultiplexor. Esto es así porque una variación en la longitud  $\delta\lambda$  de onda se traslada directamente a un desplazamiento del punto focal sobre el circulo de Rowland  $\delta\xi$ . La constante de proporcionalidad entre estos dos desplazamientos viene dada por la dispersión angular del demultiplexor  $D = \partial\theta/\partial\lambda$  y el radio del circulo sobre el 25 que se coloca el deflector  $R$ . Así se tiene que

$$\delta\xi = D \cdot R \cdot \delta\lambda.$$

Por otro lado, si se deriva la expresión (12) con respecto a la longitud de onda se obtiene la dispersión angular del demultiplexor:

$$30 \quad D = \frac{\partial\theta}{\partial\lambda} = \frac{1}{n_s \cos(\theta)} \left( -\frac{1}{\lambda} + \frac{\partial n_B}{\partial\lambda} - \frac{\partial n_s}{\partial\lambda} \sin(\theta) \right)$$

Por tanto, para que los canales estén separados  $\Delta\lambda$  en longitud de onda a la vez que la guiaondas receptoras estén separadas  $W_s$  el radio del círculo sobre el que se coloca el deflector se deberá fijar a

$$5 \quad R = \frac{W_s}{D \cdot \Delta\lambda}.$$

Para el dispositivo de ejemplo aquí expuesto, se tiene que  $D \approx 0.0016 \text{ rad/nm}$  y por tanto el radio del círculo del deflector  $R$  deberá ser de  $177 \mu\text{m}$ . Con este radio, la longitud del deflector  $L_g$ , sin los adaptadores modales, deberá ser  $L_g =$

- 10  $167 \mu\text{m}$  y el campo radiado deberá tener un perfil Gaussiana con una anchura de  $42 \mu\text{m}$ . Para sintetizar este campo se deberá usar el procedimiento explicado para la primera realización preferente.

Por último, se deberán posicionar tantas guiaondas receptoras de salida como 15 canales se quiera tener en el demultiplexor. Así, la guiaonda de canal receptora correspondiente al canal cuya longitud de onda central es  $\lambda_c$  deberá posicionarse sobre el círculo de Rowland como se explica a continuación. El punto medio de la interfaz de la guiaonda de canal receptora con la guiaonda de canal de silicio se deberá colocar en el punto que se produce la intersección 20 de:

- la circunferencia de Rowland
- y la recta que forma un ángulo  $\theta(\lambda_c)$  con el círculo del deflector y pasa por el punto de este círculo en el cual el deflector ha radiado la mitad de la potencia total radiada,

25 y el eje de propagación de la guiaonda de canal debe estar alineado con la recta antes descrita.

La figura 14 muestra la transmisión del dispositivo descrito, desde el puerto de 30 entrada (1201) a cada uno de los puertos de salida (1205), obtenida mediante una simulación FDTD. Se ve como tanto la separación como el nivel de diafonía

se concuerdan con los valores establecidos en los requisitos del diseño. Por otro lado, gracias a la gran eficiencia del deflector las pérdidas de inserción son sub-decibelio para los 5 canales.

- 5 El dispositivo descrito puede añadirse de forma inmediata la capacidad de sintonía para corregir errores de fabricación y asegurar que los canales están en las longitudes de onda deseadas. Para ello, por ejemplo, se puede colocar un calentador (502) encima de la guiaonda de canal (100) para así controlar la dirección en la que se propaga el haz  $\theta$  dentro de la guiaonda de película. Esta 10 configuración se muestra en la figura 12, en esta figura se muestra un deflector lateral con un calentador. El efecto que produce el calentamiento de la guiaonda de canal sobre la respuesta del demultiplexor se muestra en la figura 15. Esta figura muestra cómo se mueve la respuesta del demultiplexor cuando se calienta 60 K. Este calentamiento produce un movimiento en la respuesta del 15 demultiplexor de 3 nm aproximadamente demostrándose así la posibilidad de ajuste térmico. Este calentamiento requeriría un consumo eléctrico de unos 96 mW de potencia. Esto significa que solo se tiene que gastar 32 mW para mover la respuesta del dispositivo 1 nm. Es importante notar que este valor de eficiencia energética mejora notablemente los valores reportados hasta la fecha 20 en el estado del arte de los demultiplexores ajustables térmicamente implementados en la plataforma de SOI.

### **Antena óptica alimentada por un deflector de haz único**

- 25 La figura 16.a muestra de forma esquemática un ejemplo de una antena óptica integrada alimentada por un deflector lateral de haz único. La luz entrante al deflector de haz único es acoplada a una guiaonda de película en forma haz gaussiano ancho. Este haz gaussiano alimenta una rejilla de difracción vertical definida dentro de la guiaonda de película (1402). Esta rejilla de difracción 30 vertical funcionando como una antena óptica que radia un haz directivo fuera del chip (1404). Nótese que al igual que el demultiplexor propuesto, en esta configuración la dirección de propagación del haz generado por el deflector

dentro de la guiaonda a de película  $\theta$  es controlable mediante la longitud de onda y/o modulación del índice de refracción efectivo de la guiaonda de canal.

En esta configuración el deflector realiza una doble función, por un lado, 5 expande el haz y lo conforma para que se ajuste a la anchura de la rejilla de difracción y por otro lado la dirección con la que radia el haz controla directamente la dirección en que radia la antena.

Nótese que este tipo de alimentación permite conseguir pinceles muy estrechos 10 simplemente ensanchando la rejilla de difracción que implementa la antena e rediseñando el deflector para que genere un haz igualmente ancho. Además, en esta configuración no se dan lóbulos secundarios que se observan en otro tipo de antenas direccionables formadas por agrupaciones de elementos radiantes (arrays). Esto es porque en este caso se tiene un solo elemento 15 radiante (la rejilla de difracción).

Por otro, lado y de forma homologa al demultiplexor propuesto, esta antena alimentada mediante un deflector de haz único permite direccionar el haz que se radia fuera del plano del chip en dos dimensiones independientes 20 controladas por la longitud de onda y la modulación del índice de refracción efectivo de la guiaonda de canal.

La figura 16.b muestra a modo de ejemplo la variación de la dirección de radiación fuera del chip cuando el deflector propuesto como realización 25 preferente del segundo aspecto de la invención (Fig. 12) es usado para alimentar una rejilla de difracción vertical. Se observa cómo tanto un cambio de la longitud de onda como un cambio en la temperatura (inducido por un calentador controlado eléctricamente) mueve la dirección de apuntamiento del haz difractado por la rejilla. Por tanto, esta invención permite controlar de forma 30 simultánea los dos ángulos de apuntamiento del haz ( $\theta_s, \phi_s$ ) actuando de forma controlada sobre la longitud de onda de operación y sobre la señal de control del modulador termo-óptico.

En este texto, la palabra “comprende” y sus variantes –como “comprendiendo”, etc.– no deben interpretarse de forma excluyente, es decir, no excluyen la posibilidad de que lo descrito incluya otros elementos, pasos, etc.

5

Por otra parte, la invención no está limitada a las realizaciones concretas que se han descrito sino abarca también, por ejemplo, las variantes que pueden ser realizadas por el experto medio en la materia –por ejemplo, en cuanto a la elección de materiales, dimensiones, componentes, configuración, etc.–, dentro 10 de lo que se desprende de las reivindicaciones.

## REIVINDICACIONES

1. Un método que comprende: proporcionar un deflector lateral de haz único que comprende: una guiaonda de canal (100), una guiaonda de película de destino (101), un sustrato (102) sobre el que se apoyan las guiaondas de canal y de película de destino (100, 101), y una cubierta que cubre las guiaondas de canal y de película de destino (100, 101); e introducir una señal óptica con una longitud de onda y polarización de trabajo en la guiaonda de canal (100); en el que:
  - 5        o la guiaonda de canal (100) comprende una perturbación periódica con periodo  $\Lambda$  y tiene un índice de refracción efectivo  $n_B$  correspondiente a un modo fundamental Floquet-Bloch para la longitud de onda y polarización de trabajo;
  - 10      o la guiaonda de película de destino (101) tiene un índice de refracción efectivo  $n_s$  para una dirección de propagación paralela a la guiaonda de canal (100);
  - 15      o el sustrato (102) tiene un índice de refracción  $n_a$ ;
  - 20      la cubierta tiene un índice de refracción efectivo  $n_c$ ;
- 25      caracterizado por que los índices de refracción efectivos de las guiaondas de canal y de película de destino (100, 101), los índices de refracción efectivos de la cubierta y del sustrato (102), la periodicidad  $\Lambda$  y la longitud de onda de trabajo  $\lambda$  están todos relacionados entre sí de forma que cumplan las condiciones de difracción de haz único  $-n_s < n_B - \frac{\lambda}{\Lambda} < -n_a$  y  $-n_s < n_B - \frac{\lambda}{\Lambda} < -n_c$  para que luz difractada por la guiaonda de canal (100) sea captada por la guiaonda de película de destino (101) evitando la difracción hacia la cubierta y el sustrato (102).
- 30      2. Un método de acuerdo a la reivindicación 1 en el que la guiaonda de película de destino (101) está formada por un metamaterial sublongitud-de-onda, SWG, compuesto de una pluralidad de secciones de un material de núcleo (301) y una pluralidad de secciones de un material de

cobertura (302), respectivamente dispuestas alternamente de manera periódica con un periodo ( $\Lambda_{SWG}$ ) menor que la longitud de onda de una luz propagada por dicha región.

- 5        3. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el deflector lateral de haz único además comprende una guiaonda de película auxiliar (105) intercalada entre la guiaonda de canal (100) y la guiaonda de película de destino (101); en el que el índice de refracción efectivo  $n_s$  es mayor al índice de refracción efectivo  $n_B$  del modo Floquet-Bloch a propagar en la guiaonda de canal (100); en el que la guiaonda de película auxiliar (105) tiene un índice de refracción efectivo  $n_{aux}$  en una dirección de propagación paralela a la guiaonda de canal (100) menor al índice de refracción efectivo  $n_B$  del modo Floquet-Bloch a propagar en la guiaonda de canal (100); en el que los índices de refracción efectivos de las guiaondas de canal y de película auxiliar (100, 105), los índices de refracción de la cubierta y del sustrato (102), la periodicidad  $\Lambda$  y la longitud de onda de trabajo  $\lambda$  están todos relacionados entre sí de forma que cumplan las condiciones de difracción de haz único  $-n_{aux} < n_B - \frac{\lambda}{\Lambda} < -n_a$  y  $-n_{aux} < n_B - \frac{\lambda}{\Lambda} < -n_c$
- 10      para que luz difractada por la guiaonda de canal (100) sea captada por la guiaonda de película auxiliar (105) evitando la difracción hacia la cubierta y el sustrato (102); en el que las guiaondas de película auxiliar y de película de destino (105, 101) están situadas para permitir la transferencia directa de potencia, desde la guiaonda de película auxiliar (105) hacia la guiaonda de película de destino (101); y en el que la guiaonda de película auxiliar (105) tiene una anchura ( $W_{SWG}$ ) configurada para evitar la transferencia de potencia directa desde la guiaonda de canal (100) a la guiaonda de película de destino (101).
- 15      20      25      30      4. Un método que comprende: proporcionar un deflector lateral de haz único que comprende: una guiaonda de canal (100), una guiaonda de película de destino (101), una guiaonda de película auxiliar (105)

intercalada entre la guiaonda de canal (100) y la guiaonda de película de destino (101), un sustrato (102) sobre el que se apoyan las guiaondas de canal y de película de destino (100, 101), y una cubierta que cubre las guiaondas de canal y de película de destino (100, 101); e introducir una señal óptica con una longitud de onda y polarización de trabajo en la guiaonda de canal (100); en el que:

- la guiaonda de canal (100) comprende una perturbación periódica con periodo  $\Lambda$  y tiene un índice de refracción efectivo  $n_B$  correspondiente a un modo fundamental Floquet-Bloch para la longitud de onda y polarización de trabajo;
- la guiaonda de película de destino (101) comprende un índice de refracción efectivo  $n_s$  que es mayor al índice de refracción efectivo  $n_B$  del modo Floquet-Bloch a propagar en la guiaonda de canal (100);
- la guiaonda de película auxiliar (105) tiene un índice de refracción efectivo  $n_{aux}$  en una dirección de propagación paralela a la guiaonda de canal (100) menor al índice de refracción efectivo  $n_B$  del modo Floquet-Bloch a propagar en la guiaonda de canal (100);
- el sustrato (102) tiene un índice de refracción  $n_a$ ;
- la cubierta tiene un índice de refracción  $n_c$ ;

caracterizado por que los índices de refracción efectivos de las guiaondas de canal y de película auxiliar (100, 105), los índices de refracción de la cubierta y del sustrato (102), la periodicidad  $\Lambda$  y la longitud de onda de trabajo  $\lambda$  están todos relacionados entre sí de forma que cumplan las condiciones de difracción de haz único  $-n_{aux} < n_B - \frac{\lambda}{\Lambda} < -n_a$  y  $-n_{aux} < n_B - \frac{\lambda}{\Lambda} < -n_c$  para que luz difractada por la guiaonda de canal (100) sea captada por la guiaonda de película auxiliar (105) evitando la difracción hacia la cubierta y el sustrato (102); caracterizado adicionalmente por que las guiaondas de película auxiliar y de película de destino (105, 101) están situadas para permitir la transferencia directa de potencia,

desde la guiaonda de película auxiliar (105) hacia la guiaonda de película de destino (101); caracterizado adicionalmente por que la guiaonda de película auxiliar (105) tiene una anchura ( $W_{SWG}$ ) configurada para evitar la transferencia de potencia directa desde la guiaonda de canal (100) a la guiaonda de película de destino (101).

- 5
  - 10
  - 15
  - 20
  - 25
  - 30
  - 8.
5. Un método de acuerdo con las reivindicaciones 3 o 4 en el que el deflector adicionalmente comprende una estructura de adaptación modal (106) entre la guiaonda de película auxiliar (105) y la guiaonda de película de destino (101) para favorecer la transmisión de la potencia desde la guiaonda de película auxiliar (105) hacia la guiaonda de película de destino (101).
6. Un método de acuerdo a las reivindicaciones 3, 4 o 5 en el que la guiaonda de película auxiliar (105) está formada por un metamaterial sublongitud-de-onda, SWG, compuesto de una pluralidad de secciones de un material de núcleo (301) y una pluralidad de secciones de un material de cobertura (302), respectivamente dispuestas alternamente de manera periódica con un periodo ( $\Lambda_{SWG}$ ) menor que la longitud de onda de una luz propagada por dicha región.
7. Un método de acuerdo a las reivindicaciones 3, 4, 5 o 6 en el que la estructura de adaptación modal (106) está formada por un metamaterial sublongitud-de-onda, SWG, compuesto de una pluralidad de secciones de un material de núcleo (301) y una pluralidad de secciones de un material de cobertura (302), respectivamente dispuestas alternamente de manera periódica con un periodo ( $\Lambda_{SWG}$ ) menor que la longitud de onda de una luz propagada por dicha región y cuyo ciclo de trabajo, DC, se va variando de forma progresiva a lo largo de la anchura ( $W_{adapt}$ ) de la estructura de adaptación.
8. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores

en el que algunas o todas las guiaondas (100, 101, 105) están formadas por un metamaterial sublongitud-de-onda, SWG.

9. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el que algunas o todas las guiaondas (100, 101, 105) están formadas por materiales de diferente composición.  
5
10. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el que algunas o todas las guiaondas (100, 101, 105) están formadas por capas de diferentes grosores.  
10
11. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el que la guiaonda de canal (100) es una cualquiera de las siguientes: guía rib, guía de canal o guía sublongitud-de-onda, SWG.  
15
12. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 3 a 7, u 8 a 11 cuando dependen directa o indirectamente de la reivindicación 3 o 4, en el que la guiaonda de película auxiliar (105), la guiaonda de película de destino (101), o uno o más interfaces de separación existentes entre las guiaondas comprende la perturbación periódica con periodo  $\Lambda$ .  
20
13. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el que proporcionar el deflector lateral de haz único comprende: proporcionar una concatenación de secciones de deflectores laterales de haz único; en el que las secciones están concatenadas en la dirección de propagación de la señal óptica por la guiaonda de canal (100), y una geometría de la guiaonda de canal (100) está configurada para conformar una amplitud y/o fase de una onda difractada, manteniéndose la condición de radiación de haz único en cada sección.  
25
14. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el deflector comprende adicionalmente uno o más adaptadores modales  
30

(604) entre una entrada y/o una salida del deflector y la guiaonda de canal (100) para interconexión con un circuito óptico integrado.

15. Un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que  
5 además comprende: proporcionar un modulador a lo largo de la  
guiaonda de canal (100) del deflector para modificar el índice de  
refracción efectivo de la guiaonda de canal (100) mediante uno o más  
de: moduladores termo-ópticos, moduladores electro-ópticos,  
moduladores de dispersión de plasma, o moduladores electroacústicos;  
10 y controlar dinámicamente, por medio del modulador proporcionado, un  
ángulo con el que se difracta el haz único en la guiaonda de película de  
destino (101).
16. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores,  
15 en el que se proporciona una pluralidad de secciones moduladoras  
concatenadas a lo largo de la dirección de propagación de la guiaonda  
de canal (100), disponiendo cada una de dichas secciones moduladoras  
de una señal de control electrónico para modificar una atenuación y/o un  
índice de refracción efectivo de la respectiva sección moduladora.  
20
17. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-14, que  
además comprende: proporcionar un multiplexor/demultiplexor de  
longitudes de onda; en el que al menos una señal óptica es introducida  
en el multiplexor/demultiplexor; en el que el multiplexor/demultiplexor  
25 comprende: el deflector lateral de haz único proporcionado; un soporte  
curvo sobre el que se dispone el deflector para generar un haz que se  
enfoca dentro de la guiaonda de película de destino (101) del deflector;  
y una pluralidad de guiaondas de canal receptoras situadas en puntos  
de la guiaonda de película de destino (101) en los cuales el haz  
difractado se enfoca para diferentes longitudes de onda, de manera que  
30 al cambiar la longitud de onda de trabajo el haz se enfoca  
predominantemente en una de las guiaondas receptoras capturando la

luz.

18. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 15-16, que además comprende: proporcionar un multiplexor/demultiplexor de longitudes de onda; en el que al menos una señal óptica es introducida en el multiplexor/demultiplexor; en el que el multiplexor/demultiplexor comprende: el deflector lateral de haz único proporcionado; un soporte curvo sobre el que se dispone el deflector para generar un haz que se enfoca dentro de la guiaonda de película de destino (101) del deflector; y una pluralidad de guiaondas de canal receptoras situadas en puntos de la guiaonda de película de destino (101) en los cuales el haz difractado se enfoca para diferentes longitudes de onda, de manera que al cambiar la longitud de onda de trabajo el haz se enfoca predominantemente en una de las guiaondas receptoras capturando la luz; y en el que el método además comprende: controlar dinámicamente una atenuación y/o un índice de refracción efectivo de la guiaonda de canal (100).
19. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que además comprende: proporcionar un dispositivo alimentador de antena óptica; en el que la al menos una señal óptica se introduce en el dispositivo alimentador; en el que el dispositivo alimentador comprende: el deflector lateral de haz único proporcionado; y una rejilla de difracción (1404) grabada sobre la guiaonda de película de destino (101) del deflector; en el que el deflector y la rejilla de difracción (1404) están dispuestos para que un haz generado incida sobre la rejilla de difracción (1404).
20. Un método según la reivindicación anterior en el que una actuación combinada sobre la longitud de onda de trabajo y sobre una señal de control del modulador del deflector lateral de haz único permite controlar de forma simultánea los dos ángulos de apuntamiento del haz ( $\theta_s, \phi_s$ )

5

21. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 19-20, en el que el dispositivo alimentador adicionalmente comprende un soporte curvo sobre el que se dispone el deflector de haz único, teniendo el soporte curvo una curva que enfoca o desenfoca para ajuste de enfoque y colimación de un haz difractado por el deflector.

10

22. Un deflector lateral de haz único que comprende:

15

- una guiaonda de canal (100) para recibir una señal óptica de entrada, que comprende una perturbación periódica con periodo  $\Lambda$ ;
- una guiaonda de película de destino (101), que tiene un índice de refracción efectivo  $n_s$  para una dirección de propagación paralela a la guiaonda de canal (100);
- un sustrato (102) sobre el que se apoyan las guiaondas de canal y de película de destino (100, 101), y tiene un índice de refracción  $n_a$ ;
- una cubierta que cubre las guiaondas de canal y de película de destino (100, 101), y tiene un índice de refracción  $n_c$ ;

20

25

caracterizado por que la dirección con la cual se difracta el orden de difracción -1 dentro de la guiaonda de película de destino (101) forma un ángulo  $\theta$  respecto a la dirección normal a la de propagación dentro de la guiaonda de canal (100), siendo  $\theta$  mayor que  $\arcseno(\max\{n_a, n_c\} / n_s)$  para que luz difractada por la guiaonda de canal (100) sea captada por la guiaonda de película de destino (101) evitando la difracción hacia la cubierta y el sustrato (102).

30

23. Un deflector lateral de haz único que comprende:

- una guiaonda de canal (100), para recibir una señal óptica de entrada, que comprende una perturbación periódica con periodo  $\Lambda$ , y tiene un índice de refracción efectivo  $n_B$  correspondiente a

- un modo fundamental Floquet-Bloch;
- una guiaonda de película de destino (101), que tiene un índice de refracción efectivo  $n_s$  que es mayor al índice de refracción efectivo  $n_B$  del modo Floquet-Bloch a propagar en la guiaonda de canal (100);
  - una guiaonda de película auxiliar (105), intercalada entre la guiaonda de canal (100) y la guiaonda de película de destino (101), y tiene un índice de refracción efectivo  $n_{aux}$  en una dirección de propagación paralela a la guiaonda de canal (100) menor al índice de refracción efectivo  $n_B$  del modo Floquet-Bloch a propagar en la guiaonda de canal (100);
  - un sustrato (102) sobre el que se apoyan las guiaondas de canal y de película de destino (100, 101), y tiene un índice de refracción  $n_a$ ;
  - una cubierta que cubre las guiaondas de canal y de película de destino (100, 101), y tiene un índice de refracción  $n_c$ ;

caracterizado por que la dirección con la cual se difracta el orden de difracción -1 dentro de la guiaonda de película de destino (101) forma un ángulo  $\theta$  respecto a la dirección normal a la de propagación dentro de la guiaonda de canal (100), siendo  $\theta$  mayor que  $\arccos(\max\{n_a, n_c\}/n_s)$  para que luz difractada por la guiaonda de canal (100) sea captada por la guiaonda de película auxiliar (105) evitando la difracción hacia la cubierta y el sustrato (102); caracterizado adicionalmente por que las guiaondas de película auxiliar y de película de destino (105, 101) están situadas para permitir transferencia directa de potencia, desde la guiaonda de película auxiliar (105) hacia la guiaonda de película de destino (101); caracterizado adicionalmente porque la guiaonda de película auxiliar (105) tiene una anchura ( $W_{SWG}$ ) configurada para evitar la transferencia de potencia directa desde la guiaonda de canal (100) a la guiaonda de película de destino (101).

24. Un deflector lateral de haz único que comprende: una concatenación de secciones de deflectores laterales de haz único según cualquiera de las reivindicaciones 22-23, caracterizado por que: las secciones están concatenadas en la dirección de propagación de la señal por la guiaonda de canal (100), y una geometría de la guiaonda de canal (100) está configurada para conformar una amplitud y/o fase de una onda difractada, manteniéndose la condición de radiación de haz único en cada sección.
- 5
25. Un deflector lateral de haz único controlable dinámicamente que comprende: un deflector lateral de haz único de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 22-24; y un modulador a lo largo la guiaonda de canal (100) para modificar el índice de refracción efectivo de la guiaonda de canal (100) mediante uno o más de: moduladores termo-ópticos, moduladores electro-ópticos, moduladores de dispersión de plasma, o moduladores electroacústicos; en el que el deflector está configurado para controlar dinámicamente, por medio del modulador proporcionado, un ángulo con el que se difracta el haz único en la guiaonda de película de destino (101).
- 10
- 20
26. Un deflector lateral de haz único controlable dinámicamente de acuerdo con la reivindicación 25, que incluye una pluralidad de secciones moduladoras concatenadas a lo largo de la dirección de propagación de la guiaonda de canal (100), disponiendo cada una de dichas secciones moduladoras de una señal de control electrónico para modificar una atenuación y/o un índice de refracción efectivo de la respectiva sección moduladora.
- 15
- 25
- 30
27. Un multiplexor/demultiplexor de longitudes de onda que comprende: un deflector lateral de haz único de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 22-26; un soporte curvo sobre el que se dispone el deflector para generar un haz que se enfoca dentro de la guiaonda de

película de destino (101) del deflector; una pluralidad de guiaondas de canal receptoras situadas en puntos de la guiaonda de película de destino (101) en los cuales el haz difractado se enfoca para diferentes longitudes de onda, de manera que al cambiar la longitud de onda de trabajo el haz se enfoca predominantemente en una de las guiaondas receptoras capturando la luz; dichas guiaondas de salida tienen una orientación que forma un ángulo  $\theta$  respecto a la recta normal al soporte curvo en el punto en el cual se ha difractado la mitad de la potencia total difractada, de manera que al cambiar la longitud de onda de trabajo el haz se enfoca predominantemente en una de las guiaondas receptoras capturando la luz; dicho ángulo  $\theta$  es superior a  $\text{arcoseno}(\max\{n_a, n_c\} / n_s)$ .

28. Un dispositivo alimentador de antena óptica que comprende: un deflector lateral de haz único de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 22-26; y una rejilla de difracción (1404) grabada sobre la guiaonda de película de destino (101) del deflector; en el que el deflector y la rejilla de difracción (1404) están dispuestos para que un haz generado incida sobre la rejilla de difracción (1404).

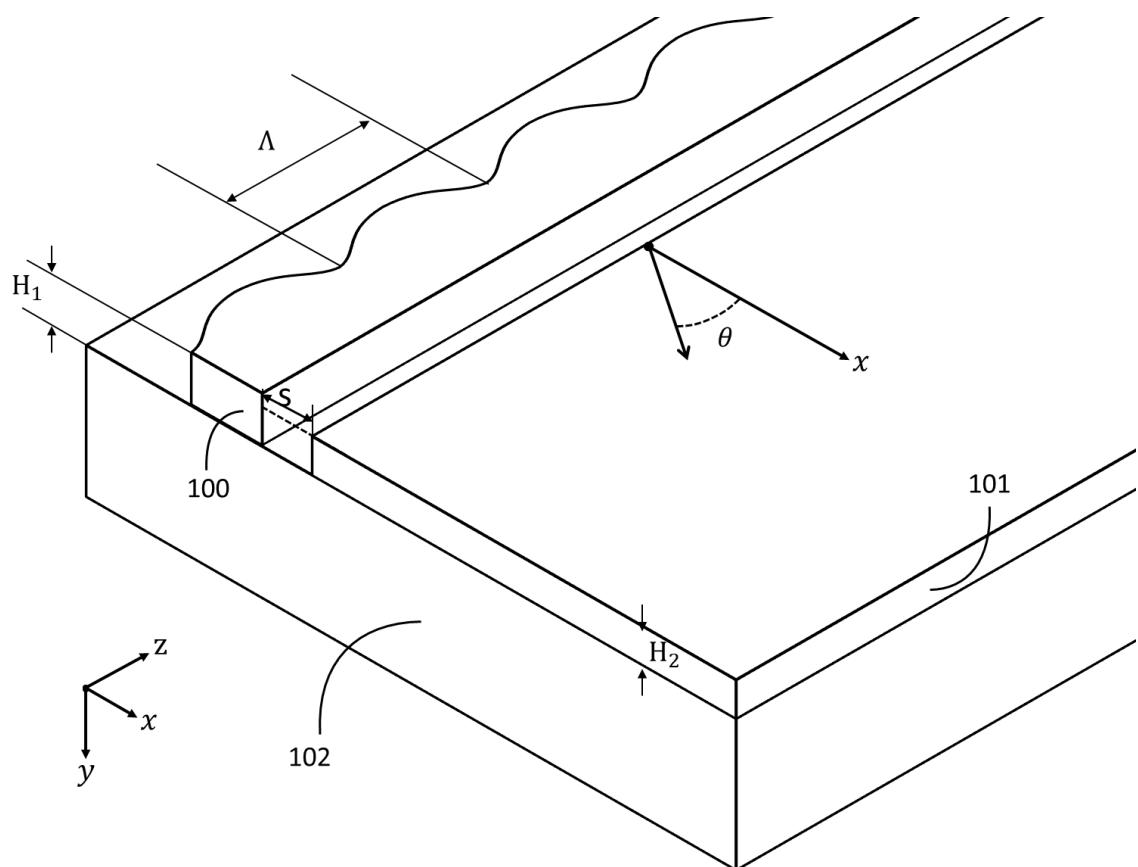
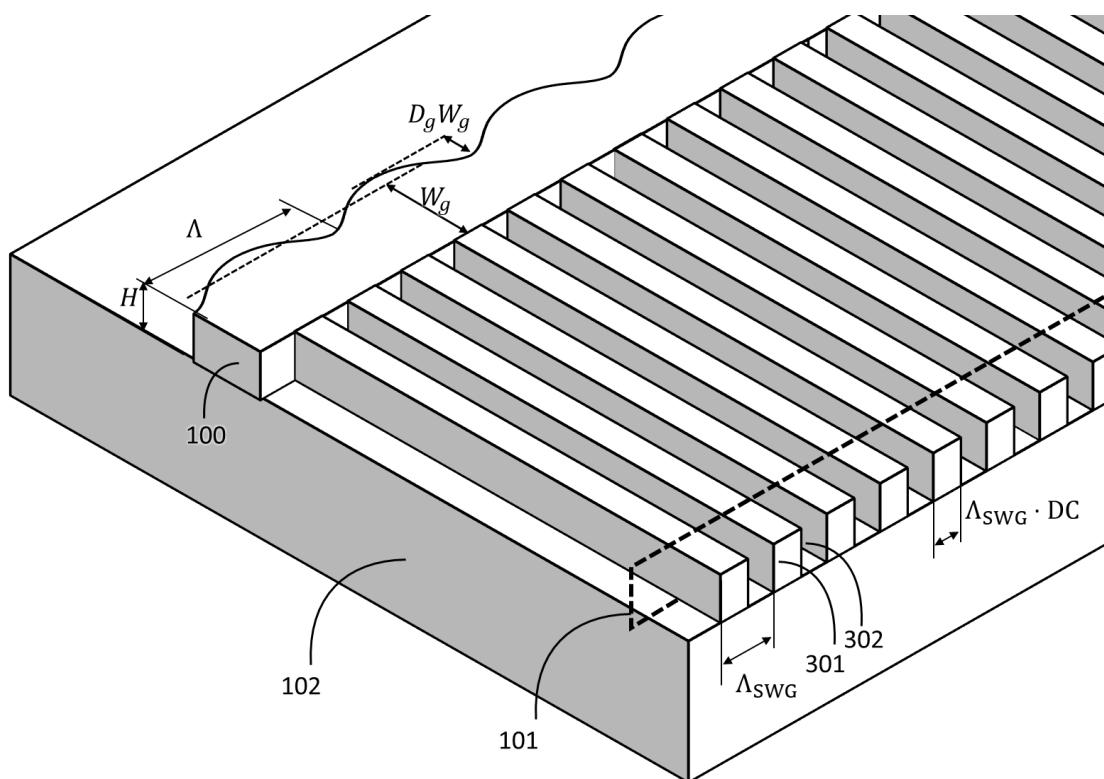


Fig. 1



*Fig. 2*

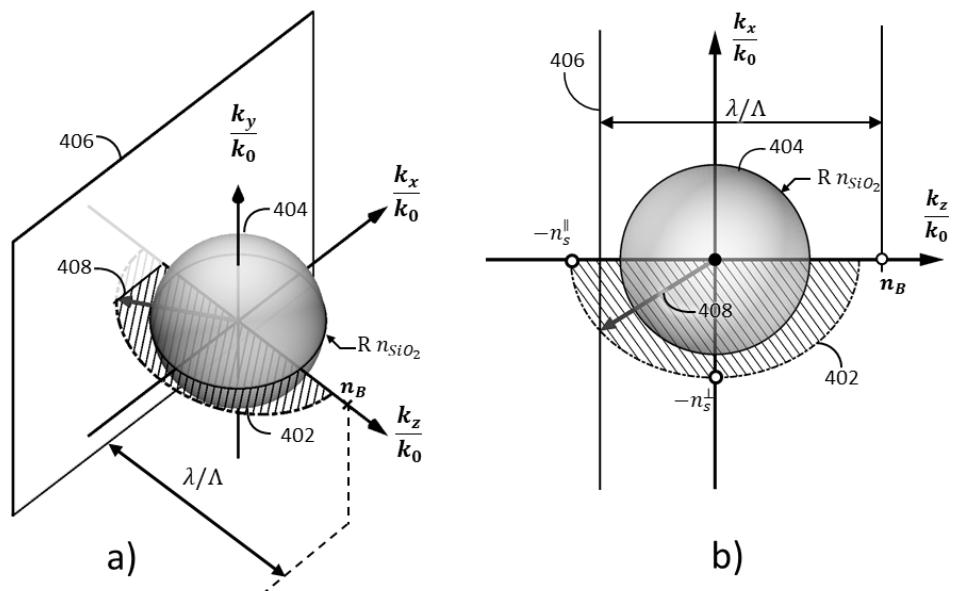


Fig. 3

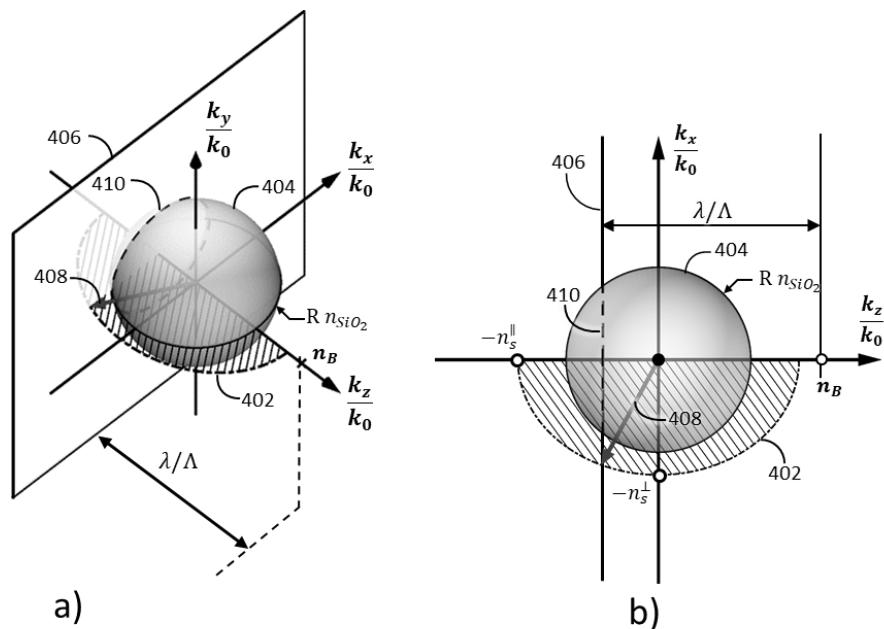
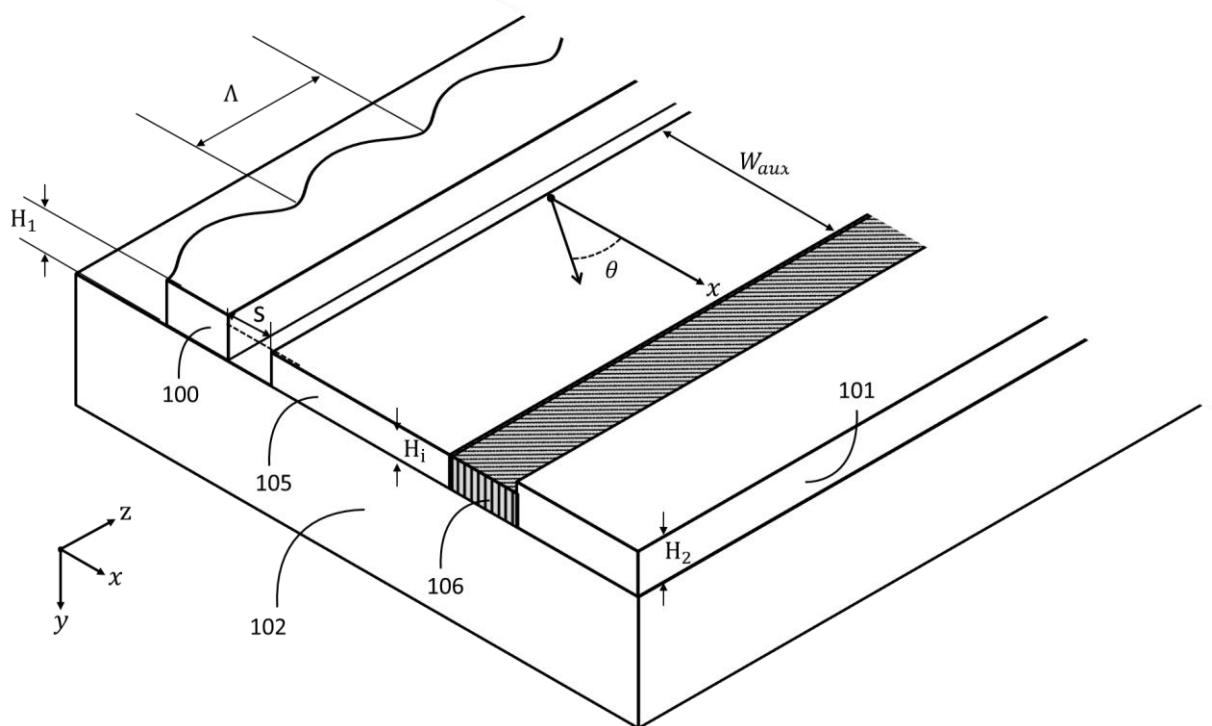


Fig. 4



*Fig. 5*

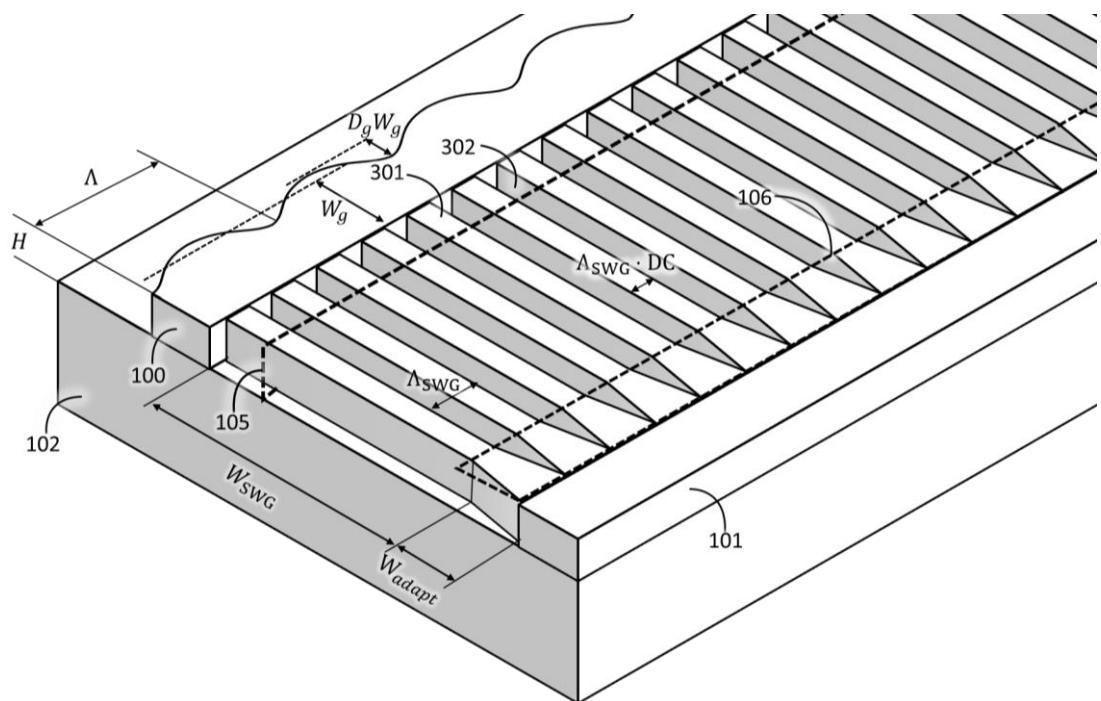
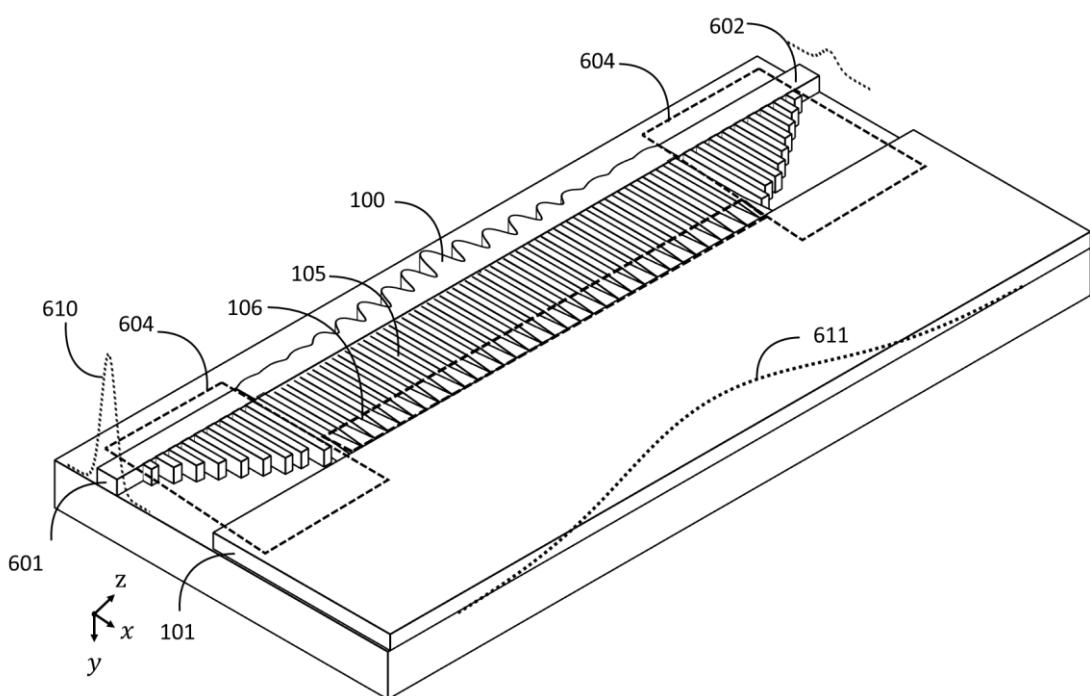


Fig. 6



*Fig. 7*

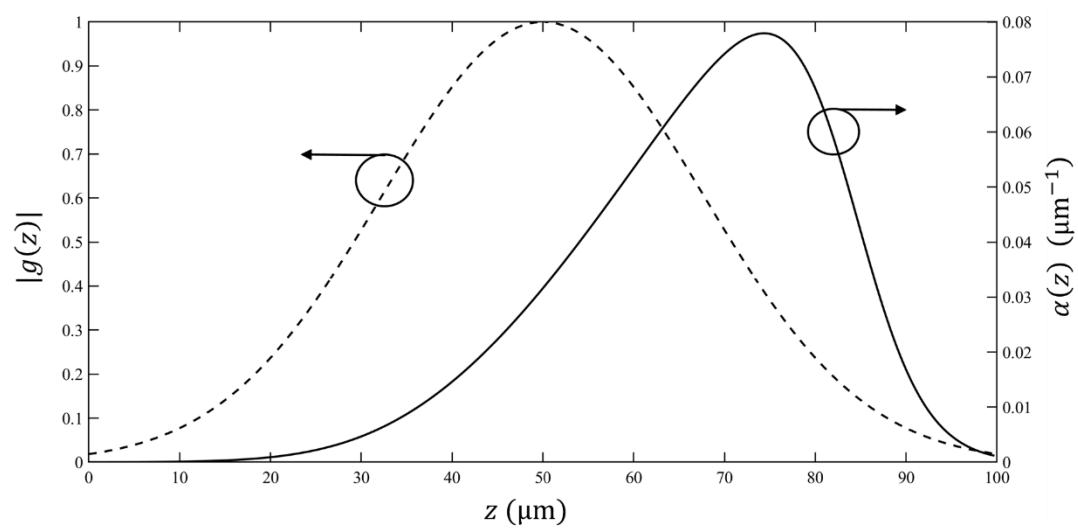


Fig. 8

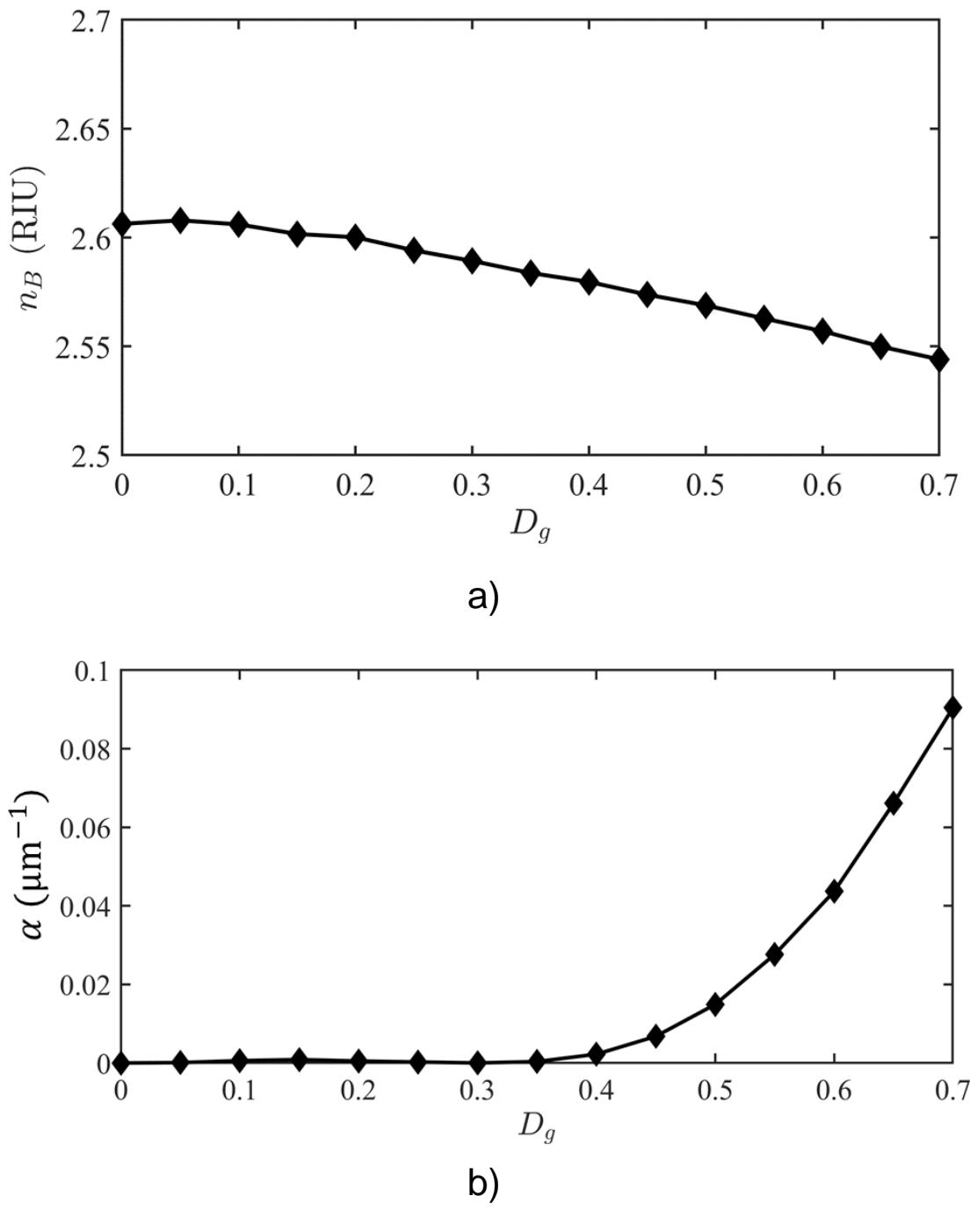


Fig. 9

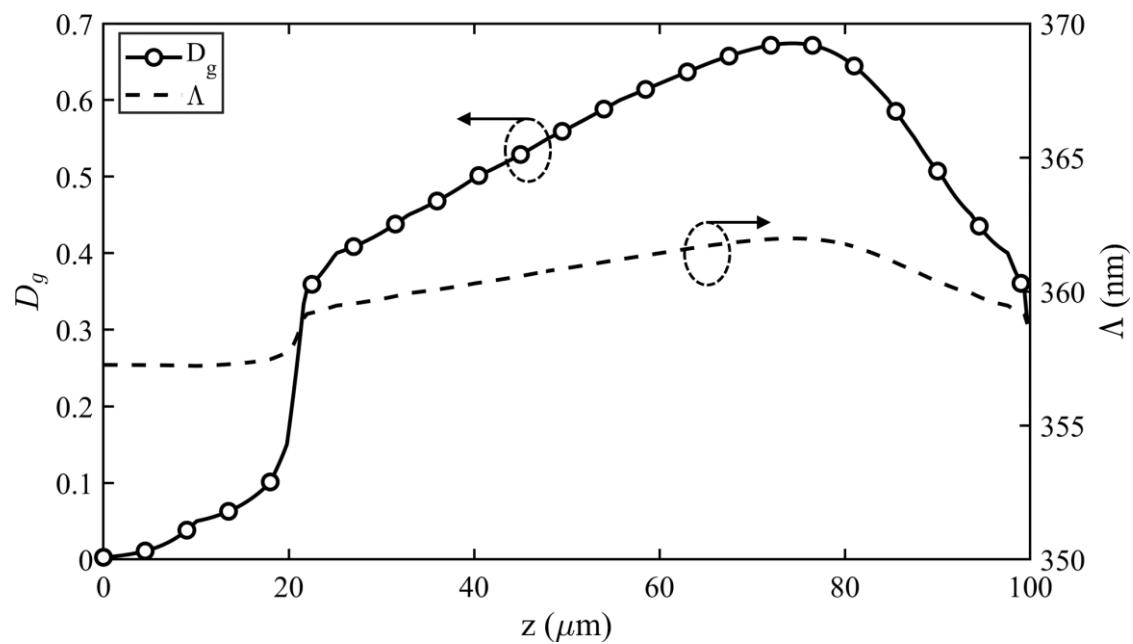


Fig. 10

ES 2 913 576 A1

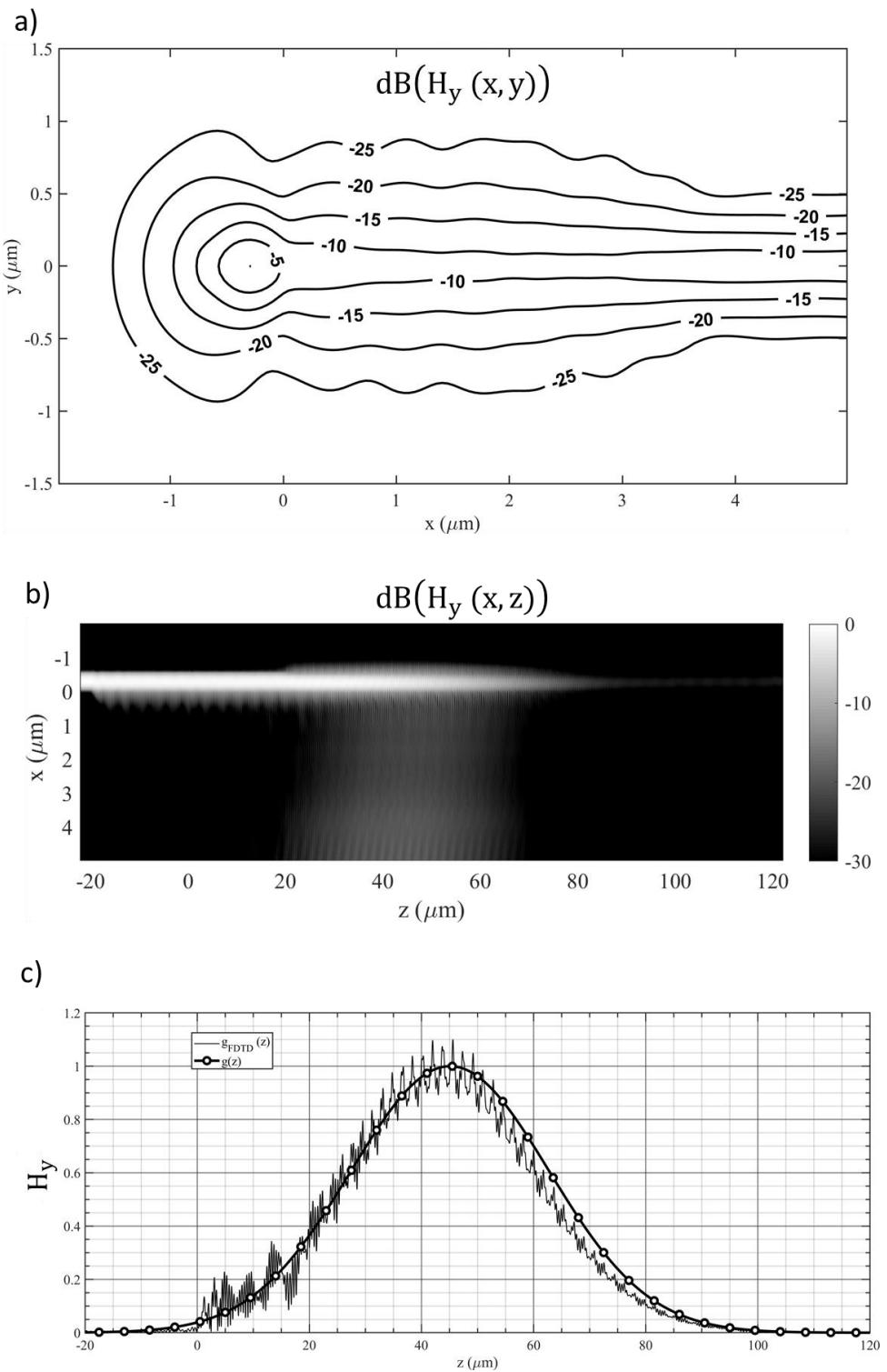
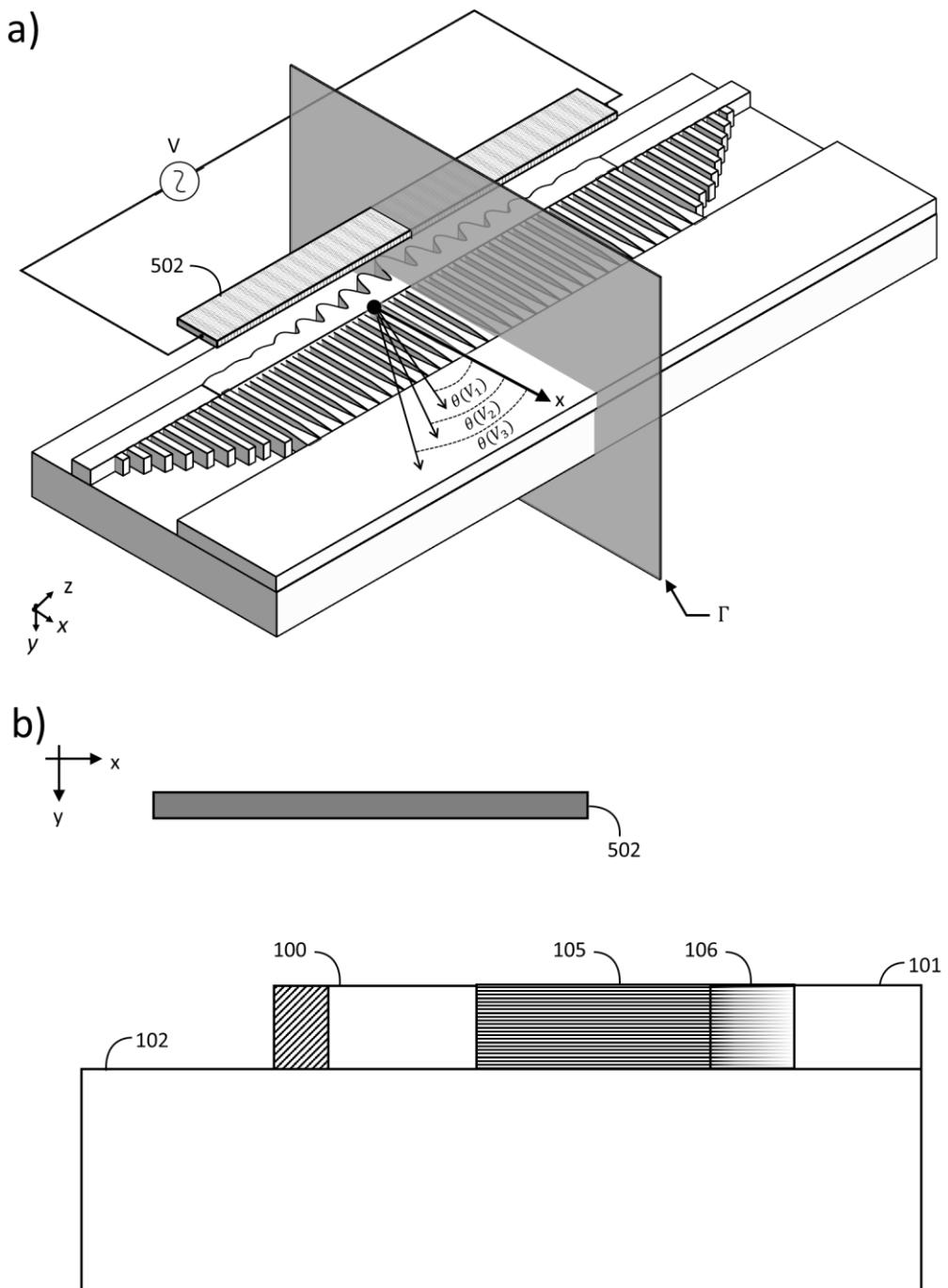


Fig. 11



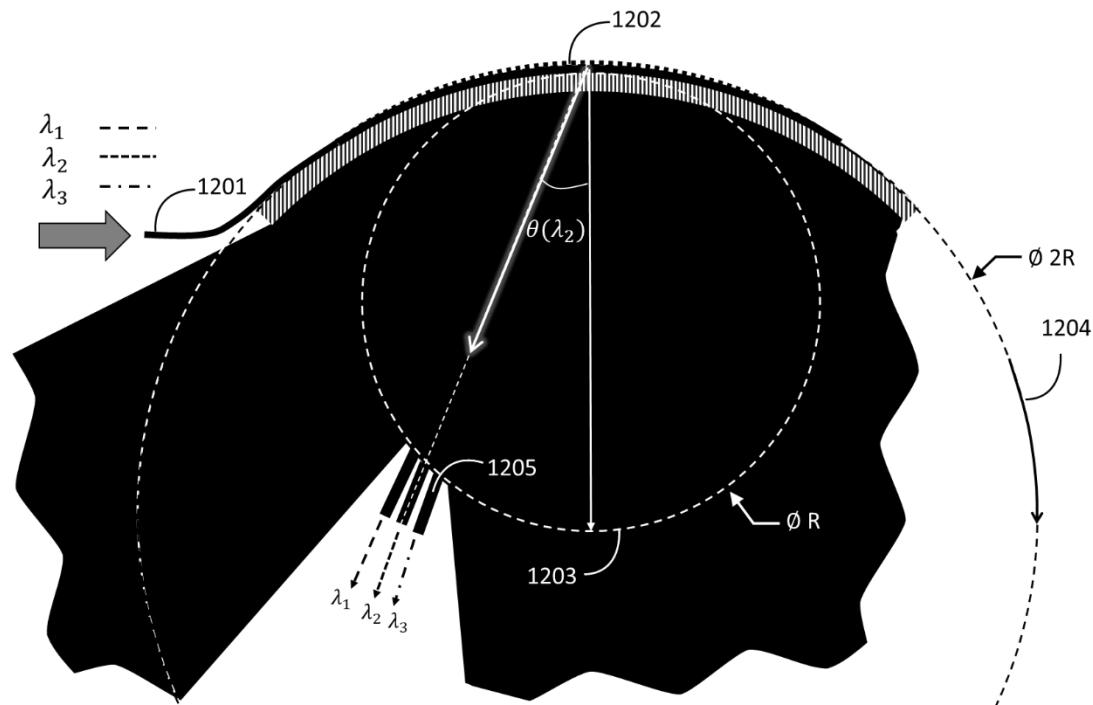


Fig. 13

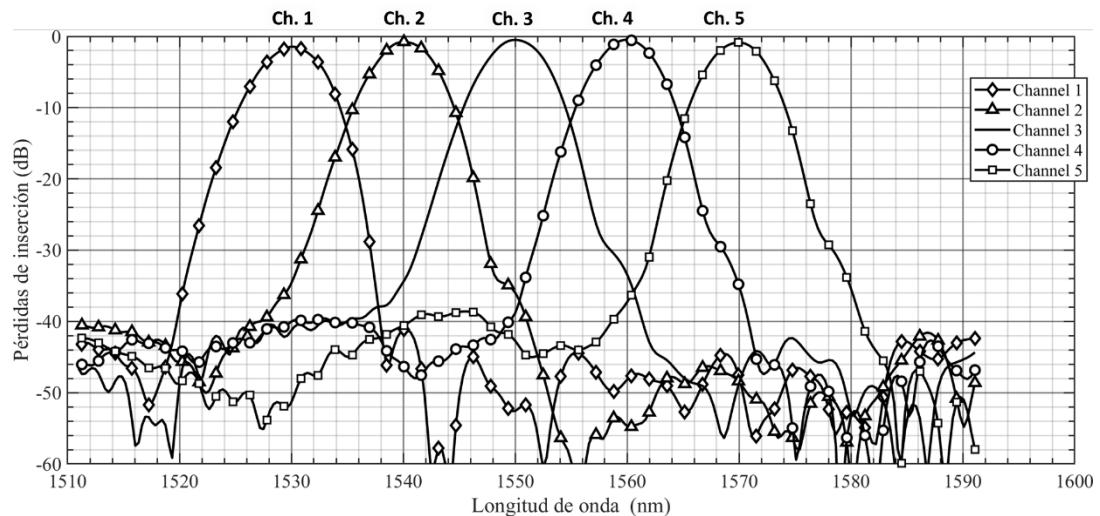


Fig. 14

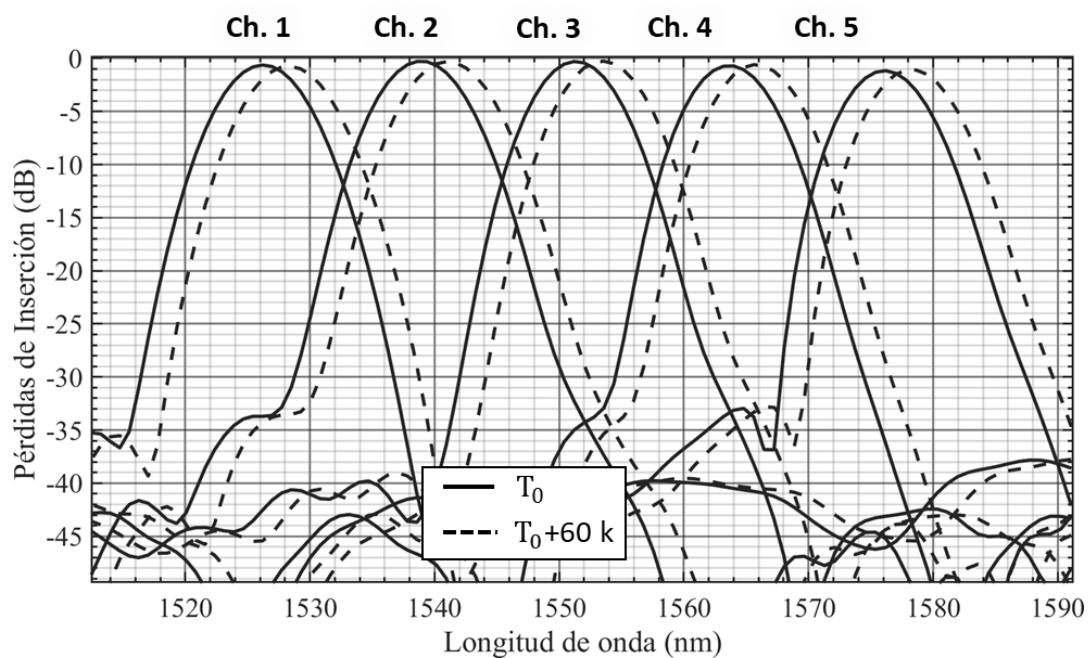
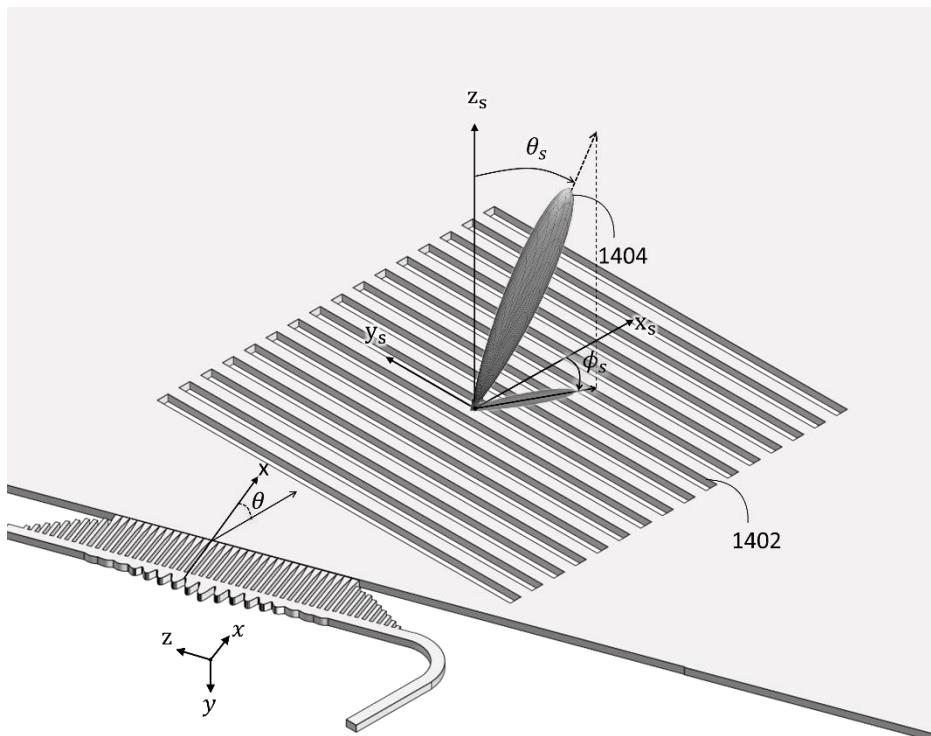
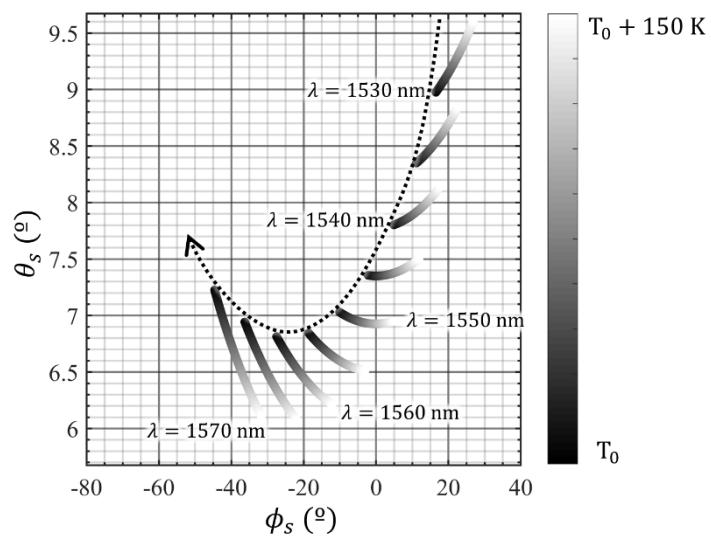


Fig. 15



a)



b)

*Fig. 16*



OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS  
ESPAÑA

②1 N.º solicitud: 202031204

②2 Fecha de presentación de la solicitud: 02.12.2020

③2 Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤1 Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑥6 Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	HADIJ-ELHOUATI et al. Distributed Bragg deflector coupler for on-chip shaping of optical beams.. OSA Publishing, Optics Express, 2019, Vol. 27, Páginas 33180-33193 [en línea][recuperado el 10/02/2021]. Recuperado de Internet <URL: <a href="https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/D7AD81C5-9981-6367-F38185F782383C92_422705/oe-27-23-33180.pdf?da=1&amp;id=422705&amp;seq=0&amp;mobile=no">https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/D7AD81C5-9981-6367-F38185F782383C92_422705/oe-27-23-33180.pdf?da=1&amp;id=422705&amp;seq=0&amp;mobile=no</a> > <DOI: doi.org/10.1364/OE.27.033180>	1-28
A	HALIR ROBERT et al. High performance silicon photonic devices based on practical metamaterials . 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC) 20190707 The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE), 07/07/2019, Páginas 1-3, <DOI: 10.23919/PS.2019.8817893>	1-28

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

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

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

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

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

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe 16.02.2021	Examinador J. Botella Maldonado	Página 1/2
------------------------------------------------	------------------------------------	---------------

## CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

**G02F1/31** (2006.01)

**G02B5/18** (2006.01)

**G02B6/12** (2006.01)

**G02B6/34** (2006.01)

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

G02F, 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.