

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **3 021 133**

(21) Número de solicitud: 202330971

(51) Int. Cl.:

G02B 6/34 (2006.01)

(12)

SOLICITUD DE PATENTE

A1

(22) Fecha de presentación:

23.11.2023

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

26.05.2025

(71) Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA (75.00%)
Avda. Cervantes, 2
29071 Málaga (Málaga) ES y
NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA
(25.00%)

(72) Inventor/es:

SÁNCHEZ POSTIGO, Alejandro;
GINEL MORENO, Pablo;
SCHMID, Jens;
HADIJ EL HOUATI, Abdelfettah;
CHEBEN, Pavel;
MOLINA FERNÁNDEZ, Íñigo;
WANGÜEMERT PÉREZ, Juan Gonzalo;
ORTEGA MOÑUX, Alejandro y
HALIR, Robert

(74) Agente/Representante:

ELION IP, S.L.

(54) Título: **DISPOSITIVO DIFRACTIVO PLANAR ÓPTICO ALTAMENTE DIRECCIONAL**

(57) Resumen:

Dispositivo difractivo planar óptico altamente direccional.

Los acopladores fuera de chip altamente direccionales comprenden una pluralidad periódica o quasi periódica de elementos difractivos cubiertos por un material con un alto índice de refracción de modo que la radiación se habilita hacia el revestimiento superior y se frustra hacia el sustrato. La geometría de los elementos difractivos se elige con precisión para controlar el perfil de campo irradiado. Por tanto, el dispositivo puede usarse como una rejilla de superficie ultraeficiente para acoplar luz entre el chip y una fibra óptica o fotodetector, como una antena óptica dispuesta en una configuración de matriz en fase, o como un sistema de interconexión de chips de pérdida ultrabaja.

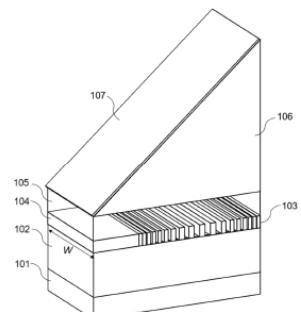


Fig. 1a

DESCRIPCIÓN**DISPOSITIVO DIFRACTIVO PLANAR ÓPTICO ALTAMENTE DIRECCIONAL****CAMPO DE LA INVENCIÓN**

- 5 La presente divulgación se refiere en general al campo de la fotónica integrada, más en particular al campo de los acopladores y antenas de rejilla de guía de ondas ópticas para irradiar luz en fibras ópticas o espacio libre desde rejillas de guía de ondas.

ANTECEDENTES DE LA DIVULGACIÓN

10

Un desafío importante en la fotónica integrada es el acoplamiento de luz dentro y fuera de guías de onda planas. El problema surge del hecho de que el tamaño de modo de las guías de ondas convencionales es normalmente órdenes de magnitud más pequeño que los diámetros de campo modal de dispositivos tales como fibras ópticas y láseres.

15

Los acopladores de borde son convertidores de modo que adaptan el tamaño de modo del dispositivo al modo de guía de ondas. Si bien estos acopladores pueden ofrecer un ancho de banda amplio y una alta eficiencia de acoplamiento, es necesario que se

20

sitúen en el borde del chip óptico, lo que limita la flexibilidad de uso. Como alternativa, los acopladores de rejilla de superficie son guías de onda con un patrón periódico o quasi periódico que irradian resonantemente el modo soportado verticalmente, con un tamaño de modo resultante que depende de la intensidad de difracción de la rejilla. La radiación vertical permite el posicionamiento en cualquier lugar del chip, lo que

25

proporciona ventajas para el acoplamiento de fibra-chip, incluyendo pruebas a escala de oblea y robustez a la desalineación de fibra, y permite la utilización de acopladores de rejilla de superficie como antenas ópticas pasivas para acoplamiento de espacio libre.

30

La potencia que es irradiada por los acopladores de rejilla de superficie convencionales, particularmente por aquellos basados en una plataforma de silicio sobre aislante (SOI), no solo se dirige hacia arriba (es decir, fuera de chip), sino

también hacia el sustrato, reduciendo así la direccionalidad y, en consecuencia, limitando la eficiencia de acoplamiento.

Para superar esta limitación, una posibilidad es la introducción de reflectores inferiores

- 5 que recuperan la luz hacia abajo, ya sea espejos metálicos o reflectores de Bragg distribuidos como se conoce en la técnica. Sin embargo, esta solución requiere procesos de fabricación complejos.

Otra opción es utilizar perfiles de rejilla flameada, para romper la simetría vertical de

- 10 la estructura, beneficiando así la interferencia constructiva en la dirección ascendente y la interferencia destructiva para la radiación descendente como se conoce en la técnica. No obstante, estos diseños necesitan al menos dos etapas de grabado, lo que introduce tolerancias de alineación de máscara y dificulta la fabricación.

- 15 Los acopladores de rejilla de superficie flameada mejorados usan dos capas de guía con patrones independientes para optimizar el acoplador de rejilla y maximizar la cantidad de potencia irradiada hacia arriba. En J. Notaros *et al.*, Ultra-efficient CMOS fiber-to-chip grating couplers, en Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), documento M2I.5, 2016, los acopladores de rejilla de superficie de
20 dos niveles logran una direccionalidad de ~99 %. Formas de rejilla más complejas (por ejemplo, inclinada) se han notificado en Su *et al.*, Fully-automated optimization of grating couplers, Optics Express, Vol. 26, n.º 4, págs. 4023-4034, febrero de 2018. En todos estos casos, el uso de perfiles de rejilla no estándar complica la fabricación.

- 25 Los acopladores de rejilla de orden cero utilizan un prisma para permitir ~95 % de radiación ascendente desde una guía de ondas de rejilla de sublongitud de onda [véase A. Sánchez-Postigo *et al.*, Broadband fiber-chip zero-order surface grating coupler with 0.4 dB efficiency, Optics Letters, Vol. 41, n.º 13, págs. 3013-3016, julio de 2016; A. Sánchez-Postigo *et al.*, Breaking the coupling efficiency–bandwidth trade-off
30 in surface grating couplers using zero-order radiation, Laser & Photonics Reviews, Vol. 15, n.º 6, 2000542, junio de 2021]. Sin embargo, inclinar el prisma complica el uso práctico de este dispositivo.

Los acopladores de rejilla de superficie se han usado para desarrollar antenas emisoras de superficie que se pueden disponer en configuraciones de matriz en fase óptica (OPA) para permitir la dirección de haz para LiDAR y comunicaciones ópticas
5 de espacio libre. Si bien se han dedicado esfuerzos sustanciales a implementar topologías de antena y arquitecturas de OPA que maximizan la divergencia del haz y el campo de visión, la optimización de la eficiencia de emisión ha recibido poca atención. No obstante, en P. Ginel-Moreno *et al.*, Highly efficient optical antenna with small beam divergence in silicon waveguides, Optics Letters, Vol. 45, n.^o 20, págs.
10 5668-5671, octubre de 2020, se utilizan antenas ópticas con segmentos en forma de L fabricadas usando dos etapas de grabado para obtener eficiencias de emisión de hasta el 72 %.

Por tanto, para acoplamiento fuera de chip, incluyendo acoplamiento de fibra-chip y
15 aplicaciones OPA, son deseables acopladores de rejilla de superficie y antenas ópticas que presenten una eficiencia de emisión o direccionalidad cercana al 100 % y con facilidad de fabricación.

Cualquier análisis de los problemas proporcionados en esta sección se ha incluido en
20 esta divulgación únicamente con el fin de proporcionar antecedentes para la presente invención, y no debe tomarse como una admisión de que parte o todo el análisis se conocía en el momento en que se elaboró la invención.

SUMARIO DE LA INVENCIÓN

25

La presente invención se refiere a dispositivos difractivos que pueden usarse como un acoplador de superficie fuera de chip para acoplar luz dentro y fuera de circuitos integrados fotónicos, conjuntos y métodos que incluyen o implican dichos dispositivos difractivos.

30

Un primer aspecto se refiere a un dispositivo difractivo para acoplar luz dentro o fuera de un circuito integrado fotónico. El dispositivo difractivo comprende: un sustrato de

un material que tiene un índice de refracción n_s ; una rejilla de guía de ondas que comprende una pluralidad de elementos radiantes y que tiene un índice de refracción efectivo n_B para difracción óptica de luz de al menos una longitud de onda λ o luz de una pluralidad de longitudes de onda (que comprende al menos una longitud de onda
5 λ) fuera de la rejilla de guía de ondas, teniendo dicha rejilla de guía de ondas un período Λ ; y un revestimiento de un material que tiene un índice de refracción n_u dispuesto en un lado de dicha rejilla de guía de ondas. El revestimiento es, por ejemplo, un revestimiento superior dispuesto en la parte superior de la rejilla de guía de ondas, es decir, el lado es el lado superior. Además, el dispositivo difractivo cumple
10 una condición de haz único. La condición de haz único es la siguiente: $-n_s < n_B - \lambda/\Lambda < -n_u$. λ es la al menos una longitud de onda, o una longitud de onda de la pluralidad de longitudes de onda, que puede ser la menor longitud de onda de la misma, la mayor longitud de onda de la misma, y/o cualquier longitud de onda de la misma entre la menor y la mayor.

15

El dispositivo difractivo, que es preferentemente plano, se fabrica en una plataforma de sustrato fotónico con una rejilla de guía de ondas que está modelada de modo que se admite un modo con fugas y la luz que se propaga a través de la rejilla se difracta. En un lado como, por ejemplo, el lado superior de la rejilla de guía de ondas, el
20 revestimiento se deposita y tiene un índice de refracción que permite el cumplimiento de la ley de conservación del momento para solo un orden de difracción en el revestimiento superior y ningún orden de difracción en el sustrato. Como el índice de refracción del material de revestimiento es mayor que el del aire, la reflexión interna total puede producirse en cualquier interfaz paralela entre ambos medios y, por lo
25 tanto, una superficie de salida inclinada, ya sea en forma de un superestrato depositado adicionalmente o de un prisma, se proporciona en algunas realizaciones. Para maximizar la eficiencia de radiación, un recubrimiento antirreflectante es, en algunas realizaciones, depositado sobre la superficie de salida. En algunas realizaciones, para acoplamiento fibra-chip, la fibra óptica está incrustada en un gel
30 de adaptación de alto índice de refracción, que actúa como revestimiento, con un índice de refracción mayor que el índice de refracción del sustrato. Por ejemplo, si el sustrato está hecho de dióxido de silicio, el índice de refracción del gel de adaptación

es mayor que 1,444 y, si el sustrato está socavado, el índice de refracción del gel de adaptación es mayor que 1.

En algunas realizaciones, un prisma de nitruro de silicio o un material con un índice
5 de refracción similar se sitúa encima de un acoplador de rejilla de silicio sobre aislante usando un revestimiento de nitruro de silicio. El paso y/o el ciclo de trabajo del acoplador de rejilla es/son tales que se cumple la condición de radiación de haz único y es posible la radiación en un ángulo perpendicular a la superficie de salida del prisma, preferentemente al menos a la longitud de onda nominal. Se usa una variación
10 suave del paso y el ciclo de trabajo para apodizar la intensidad de radiación y maximizar la superposición entre el campo irradiado y el campo modal de la fibra óptica cuando se proporciona este último (incluyendo, por ejemplo, pero sin limitación, un conjunto de acuerdo con el segundo aspecto de la divulgación a continuación), mientras que la cantidad de potencia que se irradia hacia arriba, es decir, en dicho
15 ángulo perpendicular, permanece cerca del 100 %.

En algunas realizaciones, el dispositivo difractivo comprende además una sección de adaptación para minimizar las retroreflexiones debidas al desajuste entre una guía de ondas de entrada y la estructura de rejilla. La sección de adaptación comprende una
20 pluralidad de secciones de rejilla o segmentos de guía de ondas con longitud modificada.

En algunos casos, la intensidad de radiación requerida para la superposición máxima puede no lograrse debido a las limitaciones de fabricación en el tamaño mínimo de las
25 características. A este respecto, en algunas otras realizaciones, se introduce un metamaterial de rejilla de sublongitud de onda en el acoplador de rejilla de superficie para añadir un grado de libertad para la apodización. Se pueden lograr eficiencias de acoplamiento cercanas al 90 % para un tamaño de característica mínimo estructural de 80 nm.

30

En algunos casos, el tamaño de característica mínima de la rejilla de guía de ondas es mayor que 40 nm.

En algunas realizaciones, los segmentos de la rejilla de guía de ondas que están configurados para irradiar un campo están curvados para formar una rejilla de enfoque. La curvatura es preferentemente elíptica o sustancialmente elíptica.

5

En algunas realizaciones, un prisma de nitruro de silicio o un material o metamaterial con un índice de refracción similar se sitúa encima de una microantena o nanoantena de silicio sobre aislante usando un revestimiento de nitruro de silicio. El espesor de la capa de silicio y la geometría de la estructura de rejilla son tales que se cumple la 10 condición de haz único y se maximiza la intensidad de radiación, de modo que los elementos difractivos irradiien la mayor parte de la potencia incidente en la dirección ascendente en un haz con un diámetro de campo del orden de la longitud de onda. Estas microantenas o nanoantenas pueden empaquetarse densamente para formar una matriz en fase óptica bidimensional como, por ejemplo, en el quinto aspecto de la 15 divulgación a continuación.

En algunas realizaciones, un prisma de nitruro de silicio o un material o metamaterial con un índice de refracción similar se sitúa encima de antenas ópticas de silicio sobre aislante de longitud milimétrica usando un revestimiento de nitruro de silicio. Las 20 antenas comprenden guías de onda largas con perturbaciones laterales que producen una intensidad de radiación muy baja. La geometría de las perturbaciones laterales se define de modo que se cumpla la condición de haz único y el campo irradiado se dirija solo hacia arriba, con una eficiencia de emisión cercana al 100 %. El prisma de alto índice de refracción permite amplificar la sensibilidad de longitud de onda en el aire, 25 debido a la refracción en la interfaz entre el prisma y el espacio libre. Al disponer las antenas juntas, una matriz unidimensional, como la del sexto aspecto de la divulgación a continuación, se puede formar con el ángulo de radiación estando ajustado por exploración de longitud de onda, permitiendo así aplicaciones de dirección de haz.

30 En algunas realizaciones, un prisma de nitruro de silicio o un material o metamaterial con un índice de refracción similar se sitúa encima de una superficie de silicio sobre aislante que comprende elementos difractivos de longitud y anchura milimétricas que

irradian un haz no divergente, es decir, un haz que presenta un patrón de radiación con un ancho de haz estrecho para ambos planos principales de la antena.

En algunas realizaciones, el dispositivo difractivo está adaptado para acoplar un

- 5 campo que se va a irradiar en el espacio libre, generando un haz divergente en al menos uno de los planos principales de la antena.

En algunas realizaciones, la rejilla de guía de ondas es una microantena o nanoantena que irradia un haz divergente con un tamaño de apertura entre 0,5 y 1,5 veces la

- 10 longitud de onda (es decir, la al menos una longitud de onda o una longitud de onda de la pluralidad de longitudes de onda).

En algunas realizaciones, la rejilla de guía de ondas tiene una longitud y una anchura que son, cada una, al menos 100 veces mayor que la al menos una longitud de onda

- 15 λ o una longitud de onda de la pluralidad de longitudes de onda (opcionalmente, la menor y/o mayor longitud de onda de la pluralidad de longitudes de onda).

En algunas realizaciones, la al menos una longitud de onda operativa λ o la pluralidad de longitudes de onda está dentro de cualquiera de los siguientes intervalos en los

- 20 que se cumple la condición de haz único: región visible (oscila de 380 nm a 700 nm) para aplicaciones tales como procesamiento de información cuántica, relojes ópticos o microscopía; comunicaciones ópticas de corto alcance (oscila de 850 nm a 940 nm); región de comunicación óptica (oscila de 1260 nm a 1675 nm), que se subdivide en las diferentes bandas de comunicación (banda O, banda E, banda S, banda C, banda 25 L, banda U); mid-IR (MIR) (oscila de 2 μm a 20 μm) para detección de absorción y espectroscopia.

Un segundo aspecto se refiere a un conjunto que comprende: un dispositivo difractivo de acuerdo con el primer aspecto de la divulgación, y una fibra óptica. En el conjunto,

- 30 la fibra óptica está acoplada con el dispositivo difractivo. Además, el dispositivo difractivo está configurado de modo que un perfil de un campo del mismo que se va a irradiar se superpone con un campo modal de la fibra óptica, reduciendo de este modo

las pérdidas de inserción de fibra a chip de acoplamiento; es decir, el dispositivo difractivo tiene un perfil de campo irradiado, cuando hay radiación, que se superpone al campo modal de la fibra óptica.

- 5 Un tercer aspecto se refiere a un conjunto que comprende: un dispositivo difractivo de acuerdo con el primer aspecto de la divulgación, y un fotodetector. En el conjunto, el fotodetector está acoplado con el dispositivo difractivo. El dispositivo difractivo está configurado de modo que un perfil de un campo del mismo que se va a irradiar coincide con un tamaño del fotodetector, aumentando de este modo una eficiencia de acoplamiento; es decir, el dispositivo difractivo tiene un perfil de campo irradiado, cuando hay radiación, que coincide con el tamaño del fotodetector.

Un cuarto aspecto se refiere a un conjunto que comprende al menos primer y segundo dispositivos difractivos de acuerdo con el primer aspecto de la divulgación y que

- 15 comprende al menos un superestrato. En el conjunto, el superestrato de cada dispositivo difractivo tiene un espesor de un material que tiene un índice de refracción dentro de un intervalo de $0,9 \cdot n_u$ y $1,1 \cdot n_u$ (es decir, igual o mayor que el 90 % de n_u e igual o menor que el 110 % de n_u); el espesor es, en algunas realizaciones, homogéneo, es decir, constante. Además, el primer y el segundo dispositivos
- 20 difractivos están dispuestos de modo que los superestratos respectivos están en contacto de modo que un campo que va a ser irradiado (cuando hay radiación) por uno de los primer y segundo dispositivos difractivos se acople al otro de los primer y segundo dispositivos difractivos, permitiendo así la interconexión de chips.

- 25 Para este fin, por ejemplo, dos chips de silicio sobre aislante que usan un revestimiento de nitruro de silicio se unen entre sí, uno de ellos situado boca abajo, y la luz irradiada por un acoplador de rejilla de superficie es recuperada por el otro acoplador de rejilla de superficie, permitiendo así interconexiones de chips con casi el 100 % de eficiencia.

30

Un quinto aspecto se refiere a un conjunto que comprende al menos primer y segundos dispositivos difractivos, estando al menos el primer dispositivo difractivo de

acuerdo con el primer aspecto de la divulgación y comprendiendo al menos un superestrato. En el conjunto, el superestrato del primer dispositivo difractivo tiene un espesor de un material que tiene un índice de refracción dentro de un intervalo de $0,9 \cdot n_u$ y $1,1 \cdot n_u$ (es decir, igual o mayor que el 90 % de n_u e igual o menor que el 110 % de n_u); el espesor es, en algunas realizaciones, homogéneo, es decir, constante. Además, estando dispuestos el primer y el segundo dispositivos difractivos de modo que el segundo dispositivo difractivo está en contacto con el superestrato del primer dispositivo difractivo de modo que un campo que va a ser irradiado por uno de los primer y segundo dispositivos difractivos se acople al otro de los primer y segundo dispositivos difractivos, permitiendo así la interconexión de chips.

Un sexto aspecto se refiere a una matriz bidimensional de microantenas o nanoantenas que comprende una pluralidad de dispositivos difractivos de acuerdo con el primer aspecto de la divulgación.

Los dispositivos difractivos pueden tener un tamaño de apertura entre 0,5 y 1,5 veces la al menos una longitud de onda operativa o una longitud de onda de la pluralidad de longitudes de onda. Además, en algunas realizaciones, las antenas están agrupadas en forma de una cuadrícula rectangular, una disposición radial o una distribución dispersa.

Un séptimo aspecto se refiere a una matriz de antenas de guía de ondas de longitud milimétrica que comprende una pluralidad de dispositivos difractivos de acuerdo con el primer aspecto de la divulgación.

Un octavo aspecto se refiere a un método que comprende: disponer un dispositivo difractivo de acuerdo con el primer aspecto de la divulgación; y acoplar luz de al menos una longitud de onda λ o una pluralidad de longitudes de onda en el dispositivo difractivo.

En algunas realizaciones, la luz se acopla fuera de un circuito integrado fotónico. En algunas otras realizaciones, el método comprende además acoplar al menos parte de

la luz acoplada en un circuito integrado fotónico.

En algunas realizaciones, el método comprende además irradiar campo por la rejilla de guía de ondas del dispositivo difractivo.

5

En algunas realizaciones, el método comprende además diseñar un campo que va a ser irradiado por la rejilla de guía de ondas del dispositivo difractivo seleccionando un parámetro geométrico de la rejilla de guía de ondas antes de disponer el dispositivo difractivo.

10

En algunas realizaciones, el método comprende además acoplar el dispositivo difractivo con una fibra óptica. El campo está diseñado de modo que el campo que se va a irradiar se superpone con un campo modal de la fibra óptica, reduciendo de este modo las pérdidas de inserción de fibra a chip de acoplamiento.

15

En algunas realizaciones, el método comprende además acoplar el dispositivo difractivo con un fotodetector. El campo está diseñado de modo que el campo que se va a irradiar coincide con un tamaño del fotodetector, aumentando de este modo una eficiencia de acoplamiento.

20

En algunas realizaciones, disponer el dispositivo difractivo comprende fabricar el dispositivo difractivo.

En algunas realizaciones, el método comprende además acoplar el dispositivo difractivo con el circuito integrado fotónico para acoplar luz dentro o fuera del circuito integrado fotónico.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS DIBUJO

30 La materia objeto de la presente divulgación se indica específicamente y se reivindica claramente en las reivindicaciones al final de la memoria descriptiva. Una comprensión más completa de la presente divulgación, sin embargo, se puede obtener mejor

haciendo referencia a la descripción detallada y las reivindicaciones cuando se consideran en relación con las figuras de los dibujos, en donde números similares denotan elementos similares y en donde:

- 5 Las figuras 1a y 1b muestran vistas esquemáticas en perspectiva y lateral, respectivamente, de un acoplador de rejilla de superficie apodizada para acoplamiento de chip a fibra o de chip a fotodetector de acuerdo con, por ejemplo, una primera realización.
- 10 Las figuras 1c y 1d muestran vistas esquemáticas en perspectiva y lateral, respectivamente, de un acoplador de rejilla de superficie apodizada para el acoplamiento de chip a fibra o de chip a fotodetector con un tamaño de característica mínimo superior a 80 nm y una sección de adaptación que comprende un segmento de silicio y una zanja, de acuerdo con, por ejemplo, una segunda realización.

15

Las figuras 1e y 1f muestran vistas esquemáticas en perspectiva y superior, respectivamente, de un acoplador de rejilla de superficie apodizada para el acoplamiento de chip a fibra o de chip a fotodetector con un tamaño de característica mínimo > 80 nm y rejillas de sublongitud de onda transversales entre los segmentos

20 de silicio de la rejilla de guía de ondas, de acuerdo con, por ejemplo, una tercera realización.

La figura 1g muestra una representación esquemática (vista lateral) de dos chips interconectados a través de acopladores fuera de chip, de acuerdo con, por ejemplo, una cuarta realización;

Las figuras 1h y 1i muestran vistas esquemáticas en perspectiva y superior de una antena óptica de un milímetro de largo, de acuerdo con, por ejemplo, una quinta realización.

30

La figura 1j muestra una perspectiva esquemática de una antena eléctricamente larga en ambas direcciones longitudinal y transversal, de acuerdo con, por ejemplo, una

sexta realización.

La figura 1k muestra una vista lateral de un acoplador de rejilla de superficie apodizada para acoplamiento de chip a fibra o de chip a fotodetector en el que el material de revestimiento se reemplaza por un metamaterial formado por capas apiladas de silicio y dióxido de silicio.

La figura 2 muestra un diagrama de vector de onda (k) que representa gráficamente la condición de coincidencia de fase de un haz único para un acoplador de rejilla de superficie que usa un revestimiento superior de alto índice de refracción y un prisma. Los ejes horizontal y vertical de la figura representan el módulo de los componentes z y y del vector de onda normalizados a $k_0 = 2\pi/\lambda$, es decir, k_z/k_0 y k_y/k_0 , respectivamente. El área sombreada indica el intervalo (k_z, k_y) que garantiza radiación solo hacia arriba.

15

La figura 3 muestra el campo modal objetivo de una fibra óptica SMF-28 situada por encima del chip a 55° con respecto a la vertical y el perfil de intensidad de radiación para irradiar el 95 %, 99 % y 99,9 % de la potencia de entrada y maximizar la eficiencia de acoplamiento a la fibra óptica.

20

La figura 4 esquematiza el procedimiento de diseño de acopladores de rejilla de superficie y microantenas.

La figura 5a muestra los ángulos de radiación (a una longitud de onda de, por ejemplo, 25 1550 nm y para la polarización TE) que cumplen la condición de haz único en función del paso (Λ) y el ciclo de trabajo (DC) de una rejilla de guía de ondas de placa que comprende tiras de silicio y zanjas llenas de nitruro de silicio, de acuerdo con una primera realización. La línea discontinua indica los pares (Λ , DC) que garantizan la radiación en un ángulo de, por ejemplo, 55° en un revestimiento superior de nitruro de silicio.

La figura 5b muestra la intensidad de radiación o el factor de fuga de la rejilla de guía

de ondas de placa de la figura 5a en función del paso (Λ) y el ciclo de trabajo (DC). La línea discontinua indica los pares (Λ , DC) que garantizan la radiación en un ángulo de, por ejemplo, 55° en un revestimiento superior de nitruro de silicio.

- 5 La figura 5c muestra la intensidad de radiación en función del paso de la rejilla de guía de ondas de placa de la figura 5a.

La figura 5d muestra la intensidad de radiación en función del ciclo de trabajo de la rejilla de guía de ondas de placa de la figura 5a.

10

La figura 5e muestra la intensidad de radiación requerida en función de la dirección de propagación (eje z) para irradiar un campo gaussiano cercano en un ángulo de, por ejemplo, 55° y producir una alta eficiencia de acoplamiento a una fibra óptica SMF-28 usando un acoplador de rejilla de superficie de fibra-chip de las figuras 1a - 1b.

15

La figura 5f muestra los perfiles de apodización de paso y ciclo de trabajo para lograr la intensidad de radiación objetivo de la figura 5e.

20

La figura 6a muestra la distribución de campo, simulada usando el método FDTD en 2D, de un acoplador de rejilla de superficie de chip de fibra de silicio que usa un revestimiento superior de nitruro de silicio y un prisma para una fibra óptica SMF-28, operando a una longitud de onda de 1550 nm y polarización TE, de acuerdo con una primera realización de las figuras 1a - 1b. La rejilla de guía de ondas sigue los perfiles de apodización de la figura 5f.

25

La figura 6b muestra la eficiencia de acoplamiento en función de la longitud de onda para la polarización TE para el acoplador de rejilla de superficie de fibra-chip de la figura 6a.

30

La figura 7a muestra los perfiles de apodización de paso y ciclo de trabajo de un acoplador de rejilla de superficie de fibra-chip para irradiar un campo casi gaussiano con alta eficiencia de acoplamiento a una fibra óptica SMF-28 a una longitud de onda

nominal de 1550 nm y polarización TE, para un tamaño de característica mínimo de 80 nm.

La figura 7b muestra la retrorreflexión en función de las longitudes del segmento de

- 5 silicio y la zanja rellena de nitruro de silicio de una sección de adaptación, de acuerdo con una segunda realización de las figuras 1c - 1d.

La figura 7c muestra la distribución de campo, simulada usando el método FDTD en 2D, de un acoplador de rejilla de superficie de chip de fibra de silicio que usa un

- 10 revestimiento superior de nitruro de silicio y un prisma para una fibra óptica SMF-28, operando a una longitud de onda de, por ejemplo, 1550 nm y polarización TE, para un tamaño de característica mínimo de 80 nm, de acuerdo con, por ejemplo, la segunda realización de las figuras 1c - 1d. La rejilla de guía de ondas sigue los perfiles de apodización de la figura 7a.

15

La figura 7d muestra la eficiencia de acoplamiento en función de la longitud de onda para la polarización TE para el acoplador de rejilla de superficie de fibra-chip de la figura 7c.

- 20 La figura 8a muestra los ángulos de radiación (a una longitud de onda de, por ejemplo, 1550 nm y para la polarización TE) que cumplen la condición de haz único en función del paso (Λ) y el índice de refracción equivalente (n_{SWG}) sintetizado por medio de ingeniería de metamateriales de rejilla de sublongitud de onda (SWG) de una rejilla de guía de ondas de placa que comprende tiras de silicio y zanjas sintetizadas por SWG,

- 25 para un ciclo de trabajo en la dirección de propagación del 50 %, de acuerdo con, por ejemplo, la tercera realización. La línea discontinua indica los pares (Λ , n_{SWG}) que garantizan la radiación en un ángulo de, por ejemplo, 55° en un revestimiento superior de nitruro de silicio.

- 30 La figura 8b muestra la intensidad de radiación o el factor de fuga de la rejilla de guía de ondas de placa de la figura 8a en función del paso (Λ) y el índice de refracción equivalente de las zanjas sintetizadas por SWG (n_{SWG}). La línea discontinua indica los

pares (Λ , n_{SWG}) que garantizan la radiación en un ángulo de 55° en un revestimiento superior de nitruro de silicio.

- La figura 8c muestra la intensidad de radiación en función del paso de la rejilla de guía
5 de ondas de placa de la figura 8a.

La figura 8d muestra la intensidad de radiación en función del índice de refracción equivalente n_{SWG} de la rejilla de guía de ondas de placa de la figura 8a.

- 10 La figura 8e muestra la intensidad de radiación requerida en función de la dirección de propagación (eje z) para irradiar un campo gaussiano cercano en un ángulo de, por ejemplo, 55° y producir una alta eficiencia de acoplamiento a una fibra óptica SMF-28 usando un acoplador de rejilla de superficie de fibra-chip de las figuras 1e - 1f.

- 15 La figura 8f muestra los perfiles de apodización de paso y n_{SWG} para lograr la intensidad de radiación objetivo de la figura 8e.

- La figura 8g muestra la distribución de campo, simulada usando el método FDTD en 2D, de un acoplador de rejilla de superficie de chip de fibra de silicio que usa un revestimiento superior de nitruro de silicio y un prisma para una fibra óptica SMF-28, operando a una longitud de onda de, por ejemplo, 1550 nm y polarización TE, de acuerdo con una tercera realización de las figuras 1e - 1f. La rejilla de guía de ondas sigue los perfiles de apodización de la figura 5f.

- 25 La figura 8h muestra la eficiencia de acoplamiento en función de la longitud de onda para la polarización TE para el acoplador de rejilla de superficie de fibra-chip de la figura 8g.

- La figura 8i muestra el ciclo de trabajo en la dirección transversal (DC_x) en función del 30 índice de refracción equivalente n_{SWG} para un paso transversal de 450 nm, calculado siguiendo el procedimiento notificado en J. M. Luque-González *et al.*, "A review of silicon subwavelength gratings: building break-through devices with anisotropic

metamaterials", Nanophotonics, Vol. 10, n.^o 11, págs. 2765-2797 (2021).

La figura 8j muestra el DC_x perfil de apodización para lograr la intensidad de radiación objetivo de la figura 8e para un paso transversal de 450 nm.

5

La figura 9 muestra el prisma con la convención de ángulos para una antena de longitud milimétrica con revestimiento superior de nitruro de silicio de acuerdo con la quinta realización de la figura 1h.

10 La figura 10 muestra una matriz en fase óptica bidimensional de microantenas.

Las figuras 11a y 11b muestran la eficiencia de radiación y la intensidad de radiación, respectivamente, de la antena de las figuras 1h y 1i en función de la longitud del hueco (g) y la anchura de los segmentos laterales (W_s).

15

Las figuras 12a muestra el ancho de haz del campo lejano de la antena de las figuras 1h y 1i en el prisma y cuando se difracta al aire, y la figura 12b muestra el punto de campo lejano en el aire en dirección vertical (θ) a, por ejemplo, la longitud de onda λ = 1550 nm. La figura 12c muestra una distribución del campo cercano irradiado por

20 los primeros 100 periodos de la antena, donde solo se irradia un haz ascendente.

La figura 13 muestra la sensibilidad de longitud de onda simulada en el aire de la antena rejilla de las figuras 1h y 1i. El recuadro muestra el ángulo de radiación en el aire.

25

La figura 14 muestra una matriz en fase óptica unidimensional de antenas de longitud milimétrica de acuerdo con la quinta realización de las figuras 1h y 1i.

Se apreciará que los elementos de las figuras estén ilustrados por simplicidad y
30 claridad y no necesariamente hayan sido dibujados a escala. Por ejemplo, las dimensiones de algunos de los elementos de las figuras pueden estar exageradas en relación con otros elementos para ayudar a mejorar la comprensión de realizaciones

ilustradas de la presente divulgación.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE EJEMPLOS DE REALIZACIÓN

- 5 La descripción de ejemplos de realización de la presente divulgación proporcionada a continuación es meramente ilustrativa y está concebida con fines de ilustración únicamente; la siguiente descripción no pretende limitar el alcance de la invención divulgada en el presente documento. Asimismo, la enumeración de múltiples realizaciones que tienen características establecidas no pretende excluir otras
- 10 realizaciones que tienen características adicionales u otras realizaciones que incorporan diferentes combinaciones de las características enunciadas. En este sentido, por ejemplo, se observará que los valores de los parámetros indicados a continuación (de, por ejemplo, longitud de onda, índices de refracción, etc.) son ilustrativos y están destinados a facilitar la comprensión de la presente divulgación,
- 15 dichos valores y otros valores están dentro del alcance de la presente divulgación.

Como se expone con mayor detalle más adelante, un dispositivo difractivo, preferentemente un dispositivo difractivo plano, está provisto de un revestimiento 105 que, en lo sucesivo, se denominará revestimiento superior 105 debido a su posición

20 en el dispositivo difractivo. El revestimiento superior 105 hace que el dispositivo difractivo cumpla una condición de radiación de haz único para la luz de al menos alguna longitud de onda o longitudes de onda, y preferentemente tiene un alto índice de refracción, es decir, por encima de 1,5.

- 25 En algunas realizaciones, el dispositivo comprende una rejilla de guía de ondas 103 formada por una pluralidad de elementos difractivos, con un paso Λ y ciclo de trabajo $DC = a/\Lambda$ para diseñar el ángulo de radiación y el perfil de resistencia de la rejilla a lo largo de la dirección de propagación. Las estructuras de rejilla de sublongitud de onda 109 se pueden introducir transversalmente en los huecos entre los segmentos
- 30 difractivos para lograr intensidades de radiación más bajas con tamaños de característica más grandes. En algunas realizaciones, el dispositivo plano comprende un núcleo de guía de ondas sólido 110 que se carga con una serie, es decir, una

pluralidad, de segmentos difractivos laterales 111 colocados a un lado. El modo de propagación de Bloch-Floquet se superpone de manera evanescente con los segmentos difractivos laterales que están físicamente separados del núcleo de guía de ondas. Esto permite un control preciso de la superposición y, en consecuencia, la 5 intensidad de radiación de la antena, dando como resultado un dispositivo plano con una longitud de escala milimétrica, preferentemente una longitud entre 1 mm y 10 mm.

De acuerdo con un aspecto de esta descripción, se proporciona un dispositivo difractivo (plano) para irradiar luz con una eficiencia de emisión cercana al 100 % para, 10 por ejemplo, una fibra óptica, un fotodetector, un chip óptico interconectado o espacio libre para aplicaciones de dirección de haz y lidar.

En las realizaciones de las figuras 1a y 1b, se muestra un acoplador de rejilla de superficie de fibra-chip en una plataforma de silicio sobre aislante (SOI) con un 15 sustrato de silicio 101, una capa aislante de dióxido de silicio u óxido enterrado (BOX) 102, un núcleo de rejilla de guía de ondas de silicio 104 y un revestimiento superior de nitruro de silicio con una superficie de salida inclinada. Como alternativa, se usa un revestimiento superior plano de nitruro de silicio 105 y un superestrato o un prisma de 20 un material con un índice de refracción n_p igual o similar al del nitruro de silicio, dentro de un intervalo de $\pm 10\%$, está situado encima 106. En todos los casos, se deposita un recubrimiento antirreflectante 107 sobre la superficie de salida. De ahora en adelante, por simplicidad, se supondrá la utilización de un prisma. Opcionalmente, el 25 BOX 102 puede socavarse para aumentar el intervalo de índices de refracción efectivos que cumplen dicha condición de haz único. Los materiales del revestimiento y el prisma pueden seleccionarse del grupo que consiste en nitruro de silicio, dióxido de circonio, dióxido de circonio estabilizado con itria, niobato de litio, dióxido de titanio, carburo de silicio, pentóxido de tántalo, titanato de estroncio, óxido de zinc, seleniuro de zinc, gafas ópticas de alto índice, o material con un índice de refracción superior al índice de refracción del sustrato aislante e inferior al índice de refracción del silicio.

30

Al menos en las realizaciones de las figuras 1c y 1d, unas pocas características 108, es decir, segmentos de guía de ondas, se introducen al comienzo de la rejilla como

una sección de adaptación para reducir las retroreflexiones provocadas por el desajuste de modo entre la guía de ondas de entrada y la guía de ondas de rejilla.

Al menos en las realizaciones de las figuras 1e y 1f, las estructuras de rejilla de 5 sublongitud de onda transversales 109 se introducen en los huecos entre segmentos de silicio del núcleo de rejilla de guía de ondas.

La figura 1g muestra dos chips interconectados por medio de acopladores de superficie como los de las figuras 1a - 1f.

10

Volviendo a las figuras 1h y 1i, se muestra una realización de una antena de guía de ondas SOI que comprende un revestimiento superior de nitruro de silicio 105 y un prisma 106 de nitruro de silicio o material similar con recubrimiento antirreflectante 107, con un núcleo de guía de ondas sólido 110 cargado con segmentos difractivos 15 de silicio laterales 111.

Al igual que con las realizaciones de la figura 1j, una antena de rejilla 112 es eléctricamente larga (longitud superior a 500 veces la longitud de onda operativa) en ambas direcciones transversal y longitudinal para generar un haz de espacio libre 20 altamente colimado con un pequeño ángulo de divergencia en ambas direcciones azimutal y de elevación.

En la realización de la figura 1k, el revestimiento superior de nitruro de silicio de la realización de las figuras 1a y 1b se sustituye por una pila de capas de silicio y dióxido 25 de silicio 113 que sintetiza un metamaterial con un índice de refracción similar al del nitruro de silicio.

A diferencia de otros dispositivos asistidos por prisma, en estos diseños, el prisma se puede situar en contacto directo con la superficie del chip, lo que simplifica 30 notablemente la manipulación de la estructura. Además, la fabricación del dispositivo se basa en litografía sencilla de una sola etapa.

Para minimizar las reflexiones en la discontinuidad entre el prisma y el aire (índice de refracción n_{aire}) o la fibra óptica (índice de refracción n_f), se deposita un recubrimiento antirreflectante (AR) 107 sobre la superficie de salida del formador. Este recubrimiento AR actúa como un adaptador de un cuarto de longitud de onda, con un índice de refracción $n_{\lambda/4} = \sqrt{n_p n_{\text{aire}}}$ (prisma-aire) o $n_{\lambda/4} = \sqrt{n_p n_f}$ (prisma-fibra) y espesor de $0,25\lambda/n_{\lambda/4}$.

Un dispositivo difractivo plano de las realizaciones de las figuras 1a - 1k soporta un modo de Bloch-Floquet con fugas con un índice de refracción efectivo

$$n_B = n_u \operatorname{sen} \theta_u - m \frac{\lambda}{\Lambda} - j \frac{\lambda}{2\pi} \alpha = n_s \operatorname{sen} \theta_s - m \frac{\lambda}{\Lambda} - j \frac{\lambda}{2\pi} \alpha, \quad (1)$$

donde n_u es el índice de refracción (equivalente) del revestimiento superior, θ_u es el ángulo de radiación en el revestimiento superior, n_s es el índice de refracción del sustrato, θ_s es el ángulo de radiación en el sustrato, n_B es el índice de refracción efectivo del modo de Bloch-Floquet, m es el orden de difracción, λ es la longitud de onda, Λ es el período, y α es la intensidad de radiación o el factor de fuga. La parte real del índice efectivo determina el ángulo de radiación de la luz hacia el revestimiento superior y el sustrato. El modo soportado se irradia solamente hacia arriba, permitiendo así una direccionalidad del 100 %, cuando se cumple la condición de haz único (figura 2):

$$-n_u < \operatorname{Re}(n_B) - \frac{\lambda}{\Lambda} < -n_s, \quad (2)$$

lo que implica que el ángulo de radiación es

$$\operatorname{arcsen} \left(\frac{n_s}{n_u} \right) < \theta_u < 90^\circ \quad (3)$$

y θ_s no es real.

En algunas realizaciones, tales como en las de las figuras 1a - 1g, la anchura (W) de la rejilla de guía de ondas está configurada para proporcionar un diámetro de campo irradiado específico en la dirección transversal. El paso (Λ) y el ciclo de trabajo ($DC = a/\Lambda$), o las propiedades de las características SWG transversales (Λ_x , $DC_x = a/\Lambda_x$) se puede variar a lo largo de la dirección de propagación para controlar el índice efectivo del modo de Bloch-Floquet y, en consecuencia, el ángulo de radiación para cumplir

con la condición de haz único y la intensidad de radiación.

- Para los ejemplos de realización de, por ejemplo, las figuras 1a - 1g, el índice efectivo del modo de Bloch-Floquet de una guía de ondas periódica se calcula en función de
- 5 la geometría de los elementos difractivos (por ejemplo, paso y el ciclo de trabajo). Para este cálculo, si la guía de ondas de rejilla es ancha ($W \gg \lambda$), la estructura puede considerarse x-invariante, y se pueden usar simulaciones de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) en 2D o método de expansión de modos propios (EME) en 2D de un solo período. Para microantenas ($W \approx \lambda$), se emplean simulaciones de
- 10 FDTD en 3D como se conoce en la técnica.

En las realizaciones de las figuras 1a - 1g, una plataforma de SOI está formada por una capa de nitruro de silicio ($n_u = 2$, espesor $H_u = 2 \mu\text{m}$) 105 encima de una capa central de silicio (índice de refracción $n_c = 3,476$, espesor $H = 220 \text{ nm}$) 104 encima de

15 un óxido enterrado ($n_s = 1,444$, espesor $H_{\text{BOX}} = 2 \mu\text{m}$) 102 encima de un sustrato de silicio 101. Un prisma de Ohara S-NPH3 ($n_p = 1,89$) 106 se sitúa encima del revestimiento superior. Todos los valores se consideran para una longitud de onda de 1550 nm. Estos índices de refracción producen un intervalo de ángulos de radiación para operación de haz único de $46,2^\circ < \theta_u < 90^\circ$, lo que, debido al índice de refracción

20 ligeramente más pequeño del prisma, se traduce en $49,8^\circ < \theta_{\text{aire}} < 90^\circ$ en el aire. Se puede obtener un intervalo máximo de ángulos habilitados para un haz único socavando el sustrato, por lo tanto, reemplazado por aire ($n_s = 1$). A continuación, el intervalo de ángulos de radiación es $30^\circ < \theta_u < 90^\circ$ ($31,9^\circ < \theta_{\text{aire}} < 90^\circ$).

- 25 En las realizaciones de las figuras 1a - 1f, se puede diseñar un acoplador de rejilla de superficie de revestimiento de nitruro de silicio para maximizar la eficiencia de acoplamiento a una fibra óptica SMF-28. Por simplicidad, se supondrá que la fibra óptica está en contacto físico con el prisma a través del correspondiente recubrimiento antirreflectante 107. La eficiencia de acoplamiento (CE), definida como la fracción de
- 30 potencia guiada de entrada que se irradia a la fibra óptica, se puede calcular como el producto de dos factores: la cantidad de potencia que se irradia hacia arriba (P_{rad}), ya sea acoplada o no en la fibra óptica, y la integral de superposición (OL) entre el campo

irradiado y el campo modal de la fibra óptica, es decir, $CE = P_{rad} \cdot OL$. Operando en el régimen de haz único, la primera es teóricamente el 100 % de la potencia de entrada.

Para irradiar una potencia P_{rad} con un perfil de campo específico que maximiza la superposición con un campo $G(z)$, la intensidad de radiación debe ser

$$\alpha(z) = \frac{G^2(z)}{2\left[\frac{1}{P_{rad}} - \int_0^z G^2(u)du\right]}, \quad (4)$$

donde la potencia de entrada al comienzo de la rejilla ($z = 0$) se supone que es 1. Para una fibra óptica situada en un ángulo θ con respecto a la vertical, el campo objetivo se puede aproximar como

$$G(z) = C e^{-\left(\frac{2\cos\theta}{MFD}z\right)^2}, \quad (5)$$

donde C es una constante de normalización tal que $\int_{-\infty}^{\infty} G^2(z)dz = 1$ y MFD es el

diámetro de campo modal de la fibra óptica. La figura 3 muestra el campo objetivo $G(z)$ para una fibra óptica SMF-28 con un diámetro de campo modal $MFD = 10,4 \mu m$ y un ángulo de inclinación $\theta = 55^\circ$, así como el factor de fuga $\alpha(z)$ para irradiar el 90 %, 95 % y 99,9 % de la potencia de entrada. En esta figura, $z_{máx}$ denota la posición de la guía de ondas de rejilla en la que se logra el α máximo. Es evidente que cuanto mayor sea P_{rad} es, mayor α es necesario.

De acuerdo con la Ec. (4), para irradiar toda la potencia incidente ($P_{rad} = 100 \%$) debe sintetizarse un α infinito. Por tanto, para un ángulo de fibra fijo (por ejemplo, 55°), el intervalo alcanzable de valores de α que usan geometrías de rejilla factibles pueden no ser suficientes para producir el perfil $\alpha(z)$ requerido. Al reducir P_{rad} , se pueden alcanzar valores de α sintetizables, pero esta solución reduce la direccionalidad. Toda la potencia puede irradiarse, sin embargo, estableciendo el perfil $\alpha(z)$ constante a su valor máximo para $z > z_{máx}$. Al optimizar el $\alpha(z)$ resultante, es posible maximizar la eficiencia de acoplamiento a la fibra óptica.

25

El procedimiento de diseño de las realizaciones de las figuras 1a - 1b se esquematiza en la figura 4. En primer lugar, el índice efectivo de la guía de ondas de rejilla se calcula en función de Λ y DC para la polarización TE a una longitud de onda nominal

de 1550 nm. A continuación, los ángulos de radiación se obtienen a partir de la parte real del índice efectivo usando la Ec. (1). En la figura 5a, se representan los ángulos de radiación reales que cumplen la condición de haz único. Para valores de Λ bajos ($\Lambda \leq 0,5\lambda/n_B$), la estructura entra en los regímenes de Bragg y sublongitud de onda,

5 mientras que la radiación de sustrato está habilitada para valores de Λ grandes. A partir de este mapa, se descubre la relación entre Λ y DC para mantener el ángulo θ_u constante. La curva discontinua blanca indica los pares (Λ , DC) para los cuales el ángulo de radiación se fija a 55°, lo que permite la radiación de un haz único. La figura 5b muestra la intensidad de radiación, calculada a partir de la parte imaginaria del índice efectivo, como una función de Λ y DC. Para $\theta_u = 55^\circ$, el factor de fuga alcanzable se muestra como una función de Λ y DC en las figuras 5c y 5d, respectivamente. Al combinar el perfil $\alpha(z)$ requerido de la figura 5e con los perfiles de $\alpha(\Lambda)$ y $\alpha(DC)$ de las figuras 5c y 5d, es posible obtener las funciones de apodización $\Lambda(z)$ y $DC(z)$, mostradas en la figura 5f, que conducen al campo irradiado objetivo en

10 un ángulo constante θ_u de 55°. Dado que el ángulo elegido asegura radiación de haz único hacia arriba, la direccionalidad es ~100 %. Junto con la integral de superposición de ~100 % debido a la apodización, se puede lograr una eficiencia de acoplamiento de ~100 % a la fibra óptica.

15

20 Por último, se simula la estructura de rejilla completa, monitorizando la cantidad de potencia que se acopla en una fibra óptica convenientemente situada con el ángulo de inclinación correcto de 58,7°. La distribución del campo eléctrico (polarización TE) y la eficiencia de acoplamiento del acoplador de rejilla de fibra-chip diseñado se muestran en las figuras 6a y 6b, respectivamente. Es evidente que toda la potencia se

25 irradia hacia arriba, frustrándose naturalmente la radiación hacia abajo, logrando de este modo una eficiencia de acoplamiento sin precedentes del 98 % (-0,09 dB). Las retroreflexiones son insignificantes debido a la transición suave, causada por el perfil de apodización, desde la guía de ondas de entrada homogénea y la guía de ondas de rejilla.

30

La longitud de las primeras características de las guías de ondas de rejilla no puede ser menor que un tamaño mínimo impuesto por las restricciones de fabricación. En

consecuencia, el comienzo de la rejilla no puede apodizarse en realizaciones prácticas del dispositivo, lo que, por tanto, reduciría la eficiencia de acoplamiento e introduciría dispersión y reflejos no deseados. En el ejemplo de realización de las figuras 1c - 1d, se considera un tamaño de característica mínimo de 80 nm, que es típico en técnicas de litografía de ultravioleta profundo (DUV) actualmente disponibles. Para la realización de las figuras 1c - 1d, nuevas funciones de apodización $\Lambda(z)$ y $DC(z)$, mostradas en la figura 7a, se calculan para optimizar la eficiencia de acoplamiento cuando $\Lambda(z) \cdot DC(z)$ y $\Lambda(z) \cdot [1-DC(z)]$ son mayores que 80 nm. A continuación, se incluye una sección de adaptación 108 antes del primer diente de rejilla. Esta sección de adaptación comprende un segmento de silicio de longitud L_1 y una zanja de longitud L_2 . La figura 7b muestra la retrorreflexión en función de L_1 y L_2 , mostrando que se logra una retrorreflexión mínima del 1,2 % (-19 dB) para $L_1 = 320$ nm y $L_2 = 80$ nm. Las figuras 7c y 7d muestran, respectivamente, la distribución del campo eléctrico y la eficiencia de acoplamiento lograda, con un valor máximo del 85 % (-0,71 dB).

15

En la realización de las figuras 1e - 1f, la apodización se realiza usando ingeniería de metamateriales de rejilla de sublongitud de onda (SWG) en lugar de variaciones de DC, para proporcionar un grado de libertad alternativo. Esta apodización permite fijar un ciclo de trabajo del 50 % en la dirección de propagación para aumentar el tamaño de característica mínimo de la rejilla y evitar el uso de secciones de adaptación. Una estructura periódica que comprende una serie de segmentos de índices de refracción n_1 y n_2 con un período que suprime los efectos de difracción y reflexión ($\Lambda < 0,5\lambda/n_B$) puede comportarse como una guía de ondas anisotrópica homogénea de material artificial con un índice de refracción equivalente n_{SWG} ($n_1 < n_{\text{SWG}} < n_2$). Los metamateriales de rejilla de sublongitud de onda, desde su primera demostración en guías de ondas de silicio en el NRC de Canadá, han impulsado el desarrollo de dispositivos de alto rendimiento en áreas tan diversas como guía de ondas, división de potencia, acoplamiento de bordes, manejo de polarización y biodetección, por nombrar algunos. El procedimiento de diseño sigue la figura 4, usando Λ y n_{SWG} como los parámetros de apodización. Las figuras 8a y 8b muestran el ángulo de radiación y la intensidad de radiación, respectivamente, en función del paso y el índice de refracción equivalente n_{SWG} para un ciclo de trabajo fijo en la dirección de propagación

del 50 %, lo que garantiza tamaños de característica fabricables. La línea discontinua representa pares (Λ , n_{SWG}) que conducen a $\theta_u = 55^\circ$. Las figuras 8c y 8d muestran $\alpha(\Lambda)$ y $\alpha(n_{\text{SWG}})$, respectivamente. Al mapear estas funciones en el perfil $\alpha(z)$ objetivo (figura 8e), los perfiles de apodización $\Lambda(z)$ y $n_{\text{eq}}(z)$ se obtienen, como se muestra en 5 la figura 8f. La distribución de campo simulada y la eficiencia de acoplamiento en función de la longitud de onda se muestran en las figuras 8g y 8h, respectivamente. Por último, para la implementación práctica de la estructura, usando el procedimiento notificado en J. M. Luque-González *et al.*, "A review of silicon subwavelength gratings: building break-through devices with anisotropic metamaterials", Nanophotonics, Vol. 10, n.º 11, págs. 2765-2797 (2021), $n_{\text{eq}}(z)$ se mapea en estructuras de SWG reales con un paso transversal constante Λ_x de 450 nm y un ciclo de trabajo variable $DC_x(z)$, como se muestra en las figuras 8i y 8j.

El acoplador de rejilla de superficie de revestimiento de nitruro de silicio que se 15 muestra en las figuras 1a - 1f puede diseñarse para funcionar como una microantena. El diseño es idéntico al descrito para el acoplamiento de chip a fibra excepto por el diámetro de campo modal reducido que se requiere para irradiar un haz con un diámetro de campo de menos de 5 μm en ambas direcciones longitudinal y transversal. Para lograr altas intensidades de radiación, podría ser necesario irradiar 20 con ángulos que están lejos de la vertical o usar sustratos de SOI más espesos.

Las microantenas 113 pueden disponerse para formar una matriz en fase óptica (OPA) bidimensional. La figura 9 muestra un esquema ilustrativo de una matriz de 11×5 .

25 En la realización de las figuras 1h - 1i, un acoplador de rejilla de superficie está diseñado para funcionar como una antena óptica de longitud milimétrica, que puede integrarse en una configuración de matriz en fase óptica y usarse para aplicaciones de dirección de haz tales como lidar o satcom. La antena está formada por un núcleo de guía de ondas 110 que está cargado con una disposición de segmentos laterales 30 difractivos 111. La anchura del núcleo de guía de ondas (W) se selecciona para minimizar las pérdidas por fugas al sustrato de silicio y para deslocalizar el modo guiado, lo que permite huecos fácilmente fabricables agrandados (g) entre el núcleo

de guía de ondas 110 y los bloques difractivos laterales 111. El campo evanescente interactúa con los segmentos laterales 111, con un paso (Λ) y ciclo de trabajo (DC = a/Λ) que permiten la radiación de haz único con una intensidad de radiación específica.

5

La antena de longitud milimétrica se basa en una plataforma de SOI con un núcleo de silicio ($n_c = 3,476$, $H = 220$ nm) 110 y una capa de óxido enterrado ($n_s = 1,444$, $H_{\text{BOX}} = 2$ μm) 102 encima de un sustrato de silicio 101. Un revestimiento superior de nitruro de silicio ($n_u = 2$) 105 se usa con un espesor de 2 μm , encima del cual está situado un prisma Ohara S-NHP3 ($n_p = 1,89$) 106 con un ángulo de $\psi = 55^\circ$. La representación esquemática (vista lateral) junto con la convención de ángulo se muestra en la figura 10.

En este ejemplo, se elige una anchura de núcleo de 500 nm para garantizar un funcionamiento monomodo para las guías de ondas. El índice efectivo correspondiente para un modo polarizado TM es 2,146. El período de los bloques difractivos laterales es de 410 nm para irradiar hacia el revestimiento de SiN superior con un ángulo $\theta_u = 55^\circ$, que está dentro del intervalo de condición de haz único ($-46,2^\circ < \theta_u < -90^\circ$).

20

El uso del prisma de alto índice de refracción también beneficia la sensibilidad de longitud de onda de la antena, un parámetro esencial para dirigir el haz en la dirección de elevación (θ). Específicamente, la sensibilidad de longitud de onda en el prisma es

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial \lambda} = \frac{1}{n_p \cos(\theta_p)} \left[\frac{\partial n_{FB}}{\partial \lambda} - \frac{1}{\Lambda} - \frac{\partial n_p}{\partial \lambda} \sin(\theta_p) \right] \approx \frac{1}{n_p \cos(\theta_p)} \left[\frac{n_{FB} - n_g}{\lambda} - \frac{1}{\Lambda} \right].$$

25

Al aplicar la ley de Snell en la interfaz entre el aire y la superficie de salida del prisma, la sensibilidad de longitud de onda se convierte en

$$\frac{\partial \theta_{\text{Aire}}}{\partial \lambda} = \frac{\sin(\theta_p + \psi)}{\cos(\theta_{\text{Aire}} + \psi)} \frac{\partial n_p}{\partial \lambda} + \frac{n_p \cos(\theta_p + \psi)}{\cos(\theta_{\text{Aire}} + \psi)} \left[\frac{\partial n_{FB}}{\partial \lambda} - \frac{1}{\Lambda} \right] \approx \underbrace{\frac{n_p \cos(\theta_p + \psi)}{\cos(\theta_{\text{Aire}} + \psi)}}_K \cdot \frac{\partial \theta_p}{\partial \lambda}.$$

30 En el caso de usar un prisma Ohara S-NHP3, el factor $K \geq n_p = 1,89$, lo que denota

una amplificación angular en el aire.

Suponiendo que el índice efectivo de la antena no se ve afectado después de la introducción de los segmentos de carga, a partir de la Ec. (1) se calcula un paso de 5 410 nm para irradiar al aire en un ángulo $\theta_0 = 65^\circ$ usando un prisma Ohara con un ángulo $\psi = 55^\circ$.

Para diseñar la antena, se realiza análisis de Bloch-Floquet de un solo período, incluyendo el núcleo de guía de ondas y los segmentos laterales. Al considerar la 10 constante de atenuación del modo de propagación, α , el campo modal de un período único se concatena a continuación, formando así el campo cercano de una antena de longitud milimétrica sin llevar a cabo la simulación computacionalmente exigente de la estructura completa. Este método permite calcular de manera eficiente el campo cercano irradiado, a partir del cual se puede obtener el campo lejano calculando la 15 transformada de Fourier bidimensional (integral de difracción de Fraunhofer). Esta información permite estimar la forma del haz irradiado de campo lejano y su divergencia angular con alta precisión.

Una vez que el período de rejilla y el núcleo están diseñados para irradiar en un ángulo 20 específico, la geometría de los segmentos de carga (L_s , g , W_s) se elige para lograr la constante de atenuación deseada (α) del modo de propagación. Esto es posible porque los elementos difractivos laterales están físicamente separados del núcleo de guía de ondas, lo que tiene un efecto insignificante sobre el índice efectivo de Bloch-Floquet pero un efecto considerable sobre la intensidad de radiación. Por simplicidad, 25 la longitud L_s se establece en un valor constante. A continuación, la longitud del hueco (g) y la anchura de los segmentos laterales (W_s) se explora para calcular la eficiencia de radiación y la intensidad de radiación, como se muestra en las figuras 11a y 11b, respectivamente. Como se esperaba, siempre que se satisfaga la condición de haz único, la eficiencia de radiación es cercana al 100 % y es prácticamente independiente 30 de g y W_s . Ambos parámetros se utilizan a continuación para controlar la intensidad de radiación. Para $g = 240$ nm, $L_s = 120$ nm y $W_s = 120$ nm, $\alpha = 0,0005 \mu\text{m}^{-1}$, para el que la longitud de la antena es de 2,5 mm y el ancho de haz resultante del campo

lejano es de $0,067^\circ$, como se muestra en la figura 12a y la figura 12b. La propagación FDTD en 3D del campo cercano a través de los primeros 100 periodos de la antena se muestra en la figura 12c, que muestra una direccionalidad del 100 %.

- 5 Para esta antena ilustrativa, la sensibilidad de longitud de onda en el aire es de $0,35^\circ/\text{nm}$ alrededor de la longitud de onda central de diseño, mostrada en la figura 13, que es más del doble de la sensibilidad de longitud de onda de antenas similares en SOI.
- 10 Las antenas ópticas de longitud milimétrica pueden disponerse para formar una OPA óptica unidimensional. La figura 14 muestra un esquema ilustrativo que comprende 10 antenas que comparten elementos difractivos laterales. Dependiendo de la amplitud con la que se alimenta cada antena, el punto de campo lejano tendrá una forma específica y una divergencia angular en la dirección acimutal (ϕ). Además, controlando
15 la diferencia de fase entre las antenas, el punto de campo lejano puede variar su ángulo de puntería en acimut (ϕ).

En virtud del principio de reciprocidad en óptica, el comportamiento de las rejillas de guía de ondas de todas las realizaciones es recíproco. Por lo tanto, los acopladores
20 fuera del chip no solo irradian desde el chip al aire, sino también desde la fibra óptica, láser o espacio libre al chip.

- Las aplicaciones de las realizaciones descritas incluyen acoplamiento de fibra-chip para telecomunicaciones, comunicaciones de datos y tecnologías cuánticas;
25 interconexiones de chips; dirección de haz para comunicaciones ópticas seguras en el espacio libre y comunicaciones por satélite, detección por luz y distancia (lidar), teledetección, formación de imágenes y mapeo tridimensionales, o monitorización ambiental, por nombrar algunos.
- 30 La presente invención se ha descrito anteriormente con referencia a un número de ejemplos y ejemplos de realización. Debe apreciarse que las realizaciones particulares mostradas y descritas en el presente documento son ilustrativas de la invención y su

mejor modo y no pretenden limitar de ninguna manera el alcance de la invención como se expone en las reivindicaciones. Las características de las diversas realizaciones pueden ser independientes o combinarse en cualquier combinación. Además, a menos que se indique lo contrario, diversas etapas ilustradas de un método pueden 5 realizarse secuencialmente o al mismo tiempo, y no necesariamente realizarse en el orden ilustrado. Se reconocerá que pueden realizarse cambios y modificaciones en los ejemplos de realización sin desviarse del alcance de la presente invención. Estos y otros cambios o modificaciones se pretende que estén incluidos dentro del alcance de la presente invención, como se expresa en las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo difractivo para acoplar luz dentro o fuera de un circuito integrado fotónico, que comprende:
 - 5 un sustrato de un material que tiene un índice de refracción n_s ;
 - una rejilla de guía de ondas que tiene un índice de refracción efectivo n_B para la difracción óptica de luz fuera de la rejilla de guía de ondas de al menos una longitud de onda λ o una pluralidad de longitudes de onda que comprenden al menos una longitud de onda λ , teniendo dicha rejilla de guía de ondas un período Λ ;
 - 10 un revestimiento de un material que tiene un índice de refracción n_u dispuesto en un lado de dicha rejilla de guía de ondas, en donde el dispositivo difractivo cumple una condición de haz único, siendo la condición de haz único: $-n_s < n_B - \lambda/\Lambda < -n_u$.
2. El dispositivo difractivo de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la radiación de luz para al menos una longitud de onda λ o una pluralidad de longitudes de onda se permite hacia el revestimiento superior y se frustra hacia el sustrato.
- 15 3. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el dispositivo difractivo es plano.
- 20 4. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el revestimiento está hecho de un metamaterial con un índice de refracción equivalente n_u .
- 25 5. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde dicho revestimiento tiene una superficie de salida inclinada perpendicular a una dirección a lo largo de la cual se va a difractar luz de la al menos una longitud de onda o la pluralidad de longitudes de onda.
- 30 6. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-4, que comprende además un superestrato o un prisma dispuesto sobre dicho revestimiento, siendo dicho superestrato o dicho prisma de un material que tiene un

índice de refracción dentro de un intervalo de $0,9 \cdot n_u$ y $1,1 \cdot n_u$, teniendo dicho superestrato o dicho prisma una superficie de salida inclinada perpendicular a una dirección a lo largo de la cual se va a difractar luz de la al menos una longitud de onda o la pluralidad de longitudes de onda.

5

7. El dispositivo difractivo de acuerdo con la reivindicación 6, en donde el dispositivo difractivo comprende el superestrato.

10 8. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 5-7, en donde la superficie de salida inclinada comprende un recubrimiento antirreflectante adaptado para evitar la reflexión interna total en la superficie de salida.

9. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el sustrato está socavado.

15

10. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde dicho revestimiento está hecho de un gel o resina con un alto índice de refracción en el que se puede incrustar una fibra óptica.

20 11. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la rejilla de guía de ondas tiene una anchura adaptada para proporcionar un diámetro de campo modal de un campo que se va a irradiar en una dirección transversal.

25 12. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde al menos uno de un paso y un ciclo de trabajo de la rejilla de guía de ondas está adaptado para modificar gradualmente un campo que se va a irradiar a lo largo de una dirección de propagación.

30 13. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la rejilla de guía de ondas está segmentada en una escala de sublongitud de onda para modificar gradualmente un campo que se va a irradiar.

14. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una sección de adaptación que comprende una pluralidad de segmentos de guía de ondas con una longitud que produce una 5 interferencia destructiva de retroreflexiones, situándose la pluralidad de segmentos de guía de ondas entre la guía de ondas de entrada y el primer segmento radiante de dicha rejilla de guía de ondas.
15. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 10 anteriores, en donde los segmentos de dicha rejilla de guía de ondas que están configurados para irradiar un campo están curvados para formar una rejilla de enfoque, siendo la curvatura preferentemente elíptica o sustancialmente elíptica.
16. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 11- 15, en donde el dispositivo difractivo está adaptado para acoplar un campo que se va a irradiar en el espacio libre, generando un haz divergente en al menos uno de los planos principales de la antena.
17. El dispositivo difractivo de acuerdo con la reivindicación 16, en donde la rejilla 20 de guía de ondas es una microantena o nanoantena que irradia un haz divergente con un tamaño de apertura entre 0,5 y 1,5 veces la longitud de onda.
18. El dispositivo difractivo de acuerdo con la reivindicación 16, en donde la rejilla de guía de ondas es una antena óptica de longitud milimétrica.
- 25
19. El dispositivo difractivo de acuerdo con la reivindicación 16, en donde la rejilla de guía de ondas tiene una longitud y una anchura que son, cada una, al menos 100 veces mayor que la al menos una longitud de onda λ o la pluralidad de longitudes de onda.
- 30
20. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el sustrato comprende un sustrato de silicio sobre aislante.

21. El dispositivo difractivo de acuerdo con la reivindicación 20 cuando depende directa o indirectamente de la reivindicación 6, en donde los materiales del revestimiento y el prisma se seleccionan del grupo que consiste en nitruro de silicio, dióxido de circonio, dióxido de circonio estabilizado con itria, niobato de litio, dióxido de titanio, carburo de silicio, pentóxido de tántalo, titanato de estroncio, óxido de zinc, seleniuro de zinc, gafas ópticas de alto índice, o material con un índice de refracción superior al índice de refracción del sustrato aislante e inferior al índice de refracción del silicio.
- 10 22. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde un tamaño de característica mínimo de la rejilla de guía de ondas es mayor que 40 nm.
- 15 23. El dispositivo difractivo de acuerdo con la reivindicación 22, en donde el tamaño de característica mínimo es 80 nm.
- 20 24. El dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la al menos una longitud de onda λ o la pluralidad de longitudes de onda está dentro de cualquiera de los siguientes intervalos en los que se cumple la condición de haz único: de 380 nm a 700 nm; de 850 nm a 940 nm; de 1260 nm a 1675 nm; y/o de 2 μm a 20 μm .
- 25 25. Un conjunto que comprende un dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores y una fibra óptica, estando la fibra óptica acoplada con el dispositivo difractivo; en donde el dispositivo difractivo está configurado de modo que un perfil de un campo del mismo que se va a irradiar se superpone con un campo modal de la fibra óptica, reduciendo de este modo las pérdidas de inserción de fibra a chip de acoplamiento.
- 30 26. Un conjunto que comprende un dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-24 y un fotodetector, estando el fotodetector acoplado con el

dispositivo difractivo; en donde el dispositivo difractivo está configurado de modo que un perfil de un campo del mismo que se va a irradiar coincide con un tamaño del fotodetector, aumentando de este modo una eficiencia de acoplamiento.

5 27. Una matriz bidimensional de microantenas o nanoantenas que comprende una pluralidad de dispositivos difractivos con un tamaño de apertura entre 0,5 y 1,5 veces la al menos una longitud de onda operativa de acuerdo con la reivindicación 17.

10 28. La matriz bidimensional de microantenas o nanoantenas de acuerdo con la reivindicación 27, en donde las antenas están agrupadas en forma de una cuadrícula rectangular, una disposición radial o una distribución dispersa.

29. Una matriz de antenas de guía de ondas de longitud milimétrica que comprende una pluralidad de dispositivos difractivos de acuerdo con la reivindicación 18.

15

30. Un conjunto que comprende al menos primer y segundo dispositivos difractivos, en donde al menos el primer dispositivo difractivo es de acuerdo con la reivindicación 7 o de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8-24 cuando depende directa o indirectamente de la reivindicación 7, en donde:

20 el superestrato del primer dispositivo difractivo tiene un espesor de un material que tiene un índice de refracción dentro de un intervalo de $0,9 \cdot n_u$ y $1,1 \cdot n_u$, siendo el espesor preferentemente homogéneo;

25 estando dispuestos el primer y el segundo dispositivos difractivos de modo que el segundo dispositivo difractivo está en contacto con el superestrato del primer dispositivo difractivo de modo que un campo que va a ser irradiado por uno de los primer y segundo dispositivos difractivos se acople al otro de los primer y segundo dispositivos difractivos, permitiendo así la interconexión de chips.

30 31. Un conjunto que comprende al menos primer y segundo dispositivos difractivos, estando cada uno de los primer y segundo dispositivos difractivos de acuerdo con la reivindicación 7 o de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8-24 cuando depende directa o indirectamente de la reivindicación 7, en donde:

el superestrato de cada dispositivo difractivo tiene un espesor de un material que tiene un índice de refracción dentro de un intervalo de $0,9 \cdot n_u$ y $1,1 \cdot n_u$, siendo el espesor preferentemente homogéneo;

estando dispuestos los primer y segundo dispositivos difractivos de modo que

- 5 los superestratos respectivos están en contacto de modo que un campo que va a ser irradiado por uno de los primer y segundo dispositivos difractivos se acople al otro de los primer y segundo dispositivos difractivos, permitiendo así la interconexión de chips.

32. Un método que comprende:

- 10 disponer un dispositivo difractivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-24; y

acoplar luz de al menos una longitud de onda λ o una pluralidad de longitudes de onda en el dispositivo difractivo.

- 15 33. El método de acuerdo con la reivindicación 32, en donde la luz se acopla fuera de un circuito integrado fotónico.

34. El método de acuerdo con la reivindicación 32, que comprende además acoplar al menos parte de la luz acoplada en un circuito integrado fotónico.

20

35. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 32-34, que comprende además irradiar campo por la rejilla de guía de ondas del dispositivo difractivo.

- 25 36. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 32-35, que comprende además diseñar un campo que va a ser irradiado por la rejilla de guía de ondas del dispositivo difractivo seleccionando un parámetro geométrico de la rejilla de guía de ondas antes de disponer el dispositivo difractivo.

- 30 37. El método de acuerdo con la reivindicación 36, que comprende además acoplar el dispositivo difractivo con una fibra óptica; en donde el campo está diseñado de modo que el campo que se va a irradiar se superpone con un campo modal de la fibra óptica,

reduciendo de este modo las pérdidas de inserción de fibra a chip de acoplamiento.

38. El método de acuerdo con la reivindicación 36, que comprende además acoplar el dispositivo difractivo con un fotodetector; en donde el campo está diseñado de modo 5 que el campo que se va a irradiar coincida con un tamaño del fotodetector, aumentando de este modo una eficiencia de acoplamiento.

39. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 32-38, en donde disponer el dispositivo difractivo comprende fabricar el dispositivo difractivo.

10

40. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 32-36, que comprende además acoplar el dispositivo difractivo con el circuito integrado fotónico para acoplar luz dentro o fuera del circuito integrado fotónico.

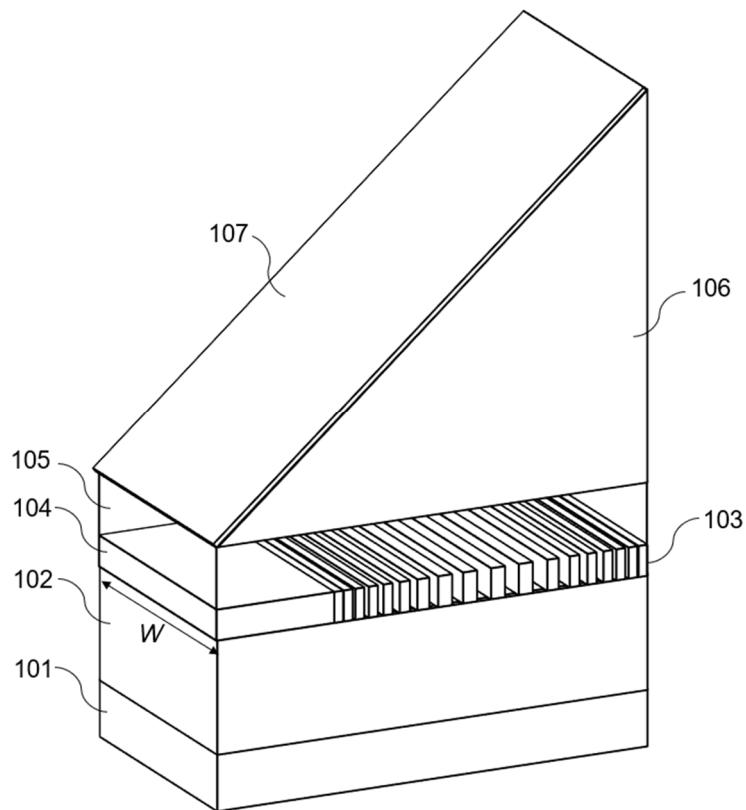


Fig. 1a

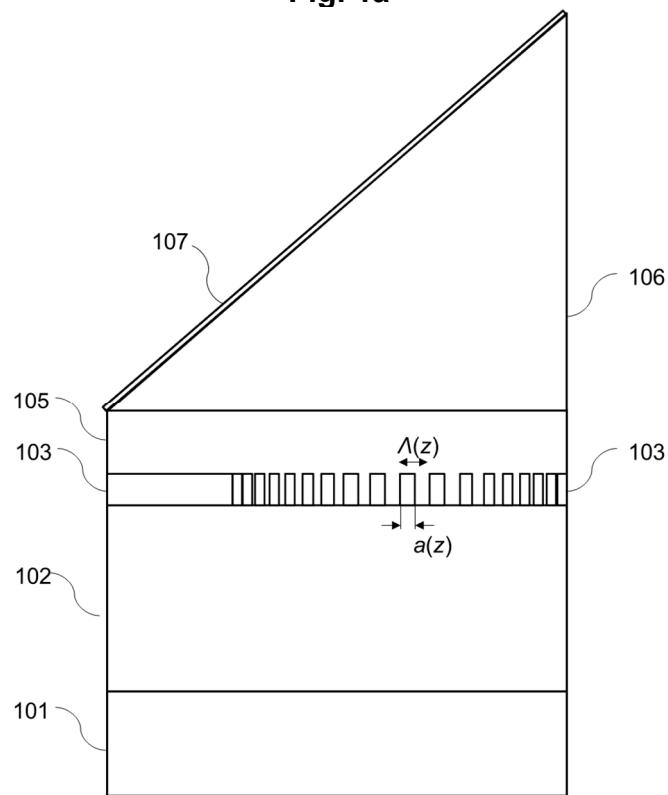


Fig. 1b

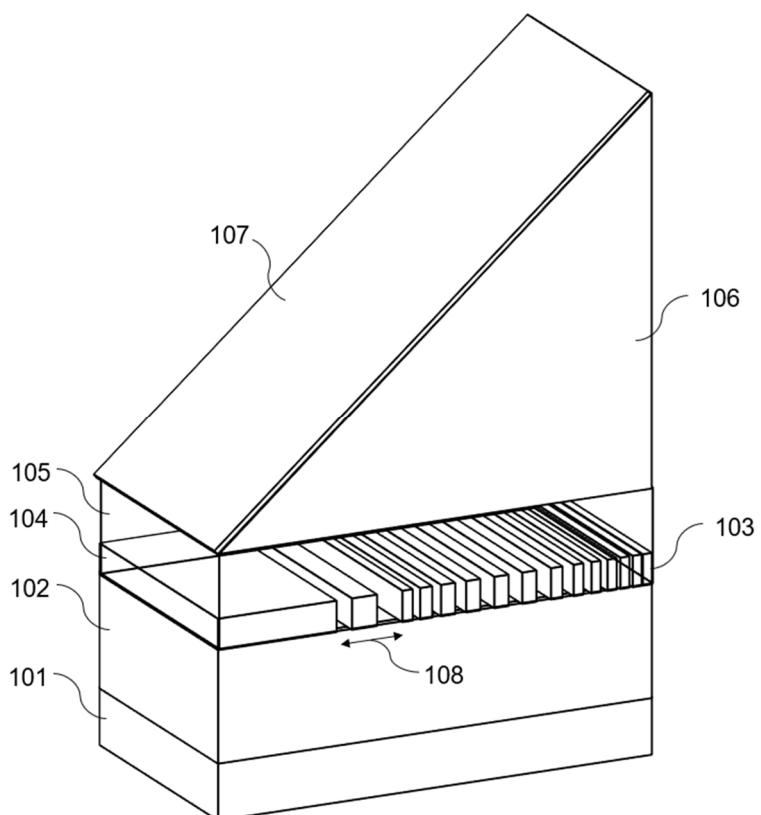


Fig. 1c

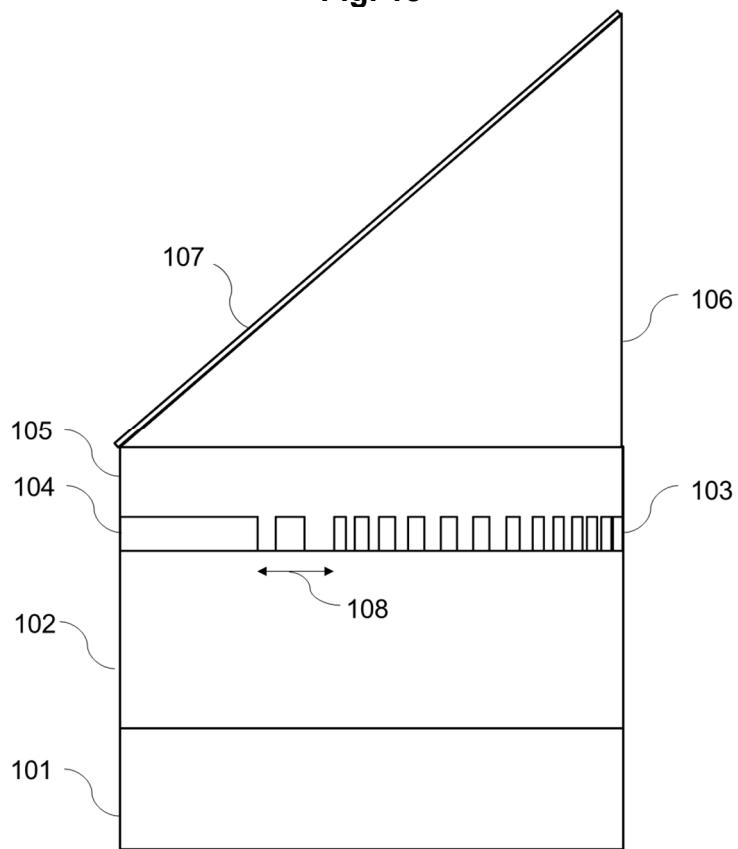
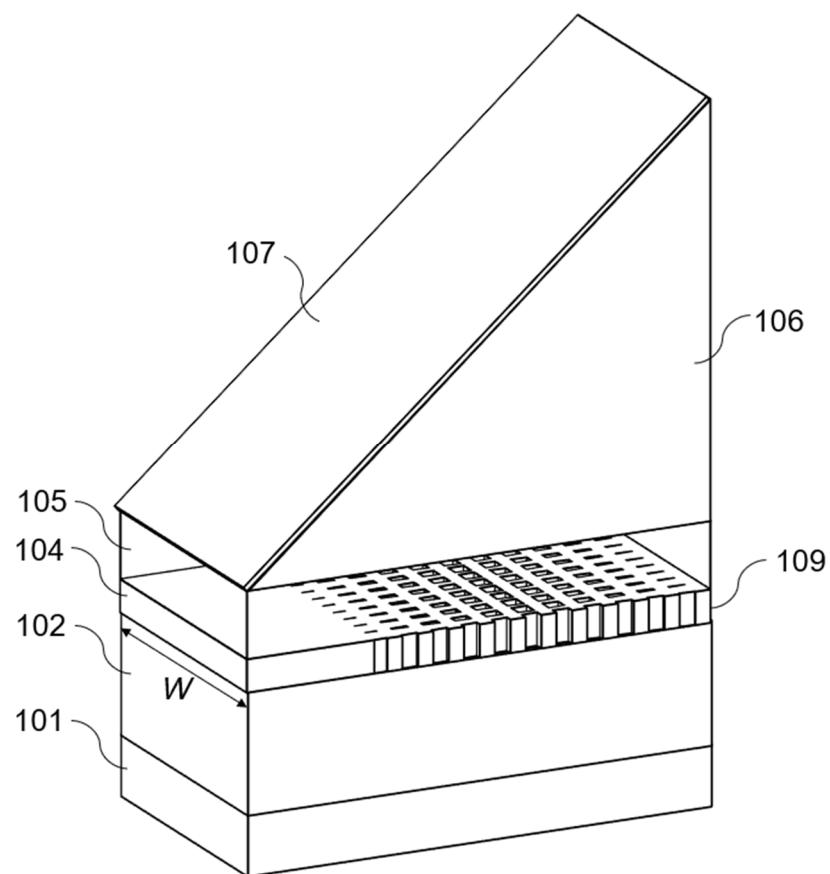
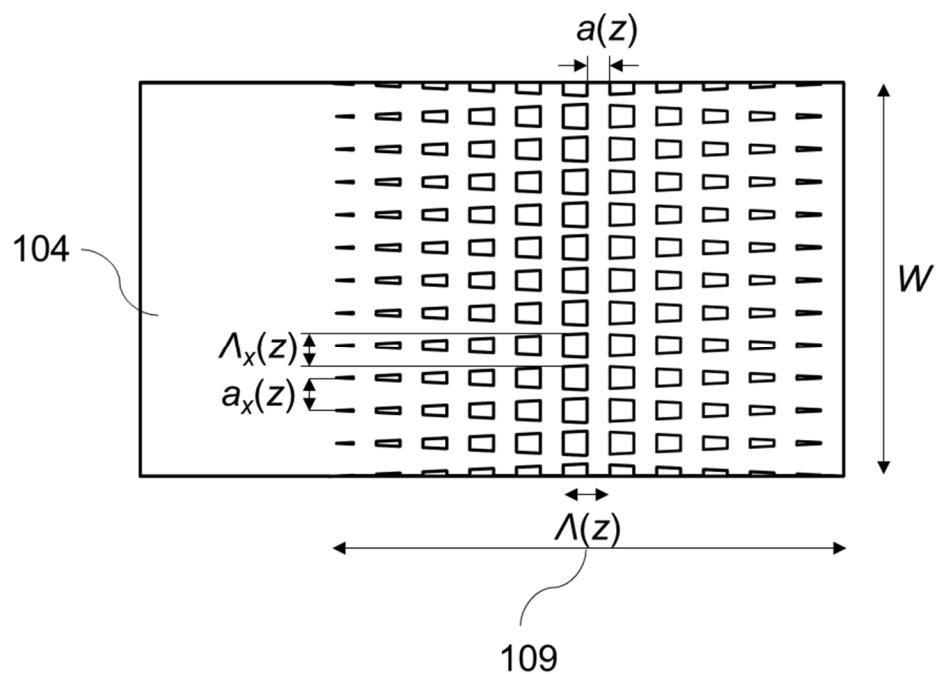


Fig. 1d

**Fig. 1e****Fig. 1f**

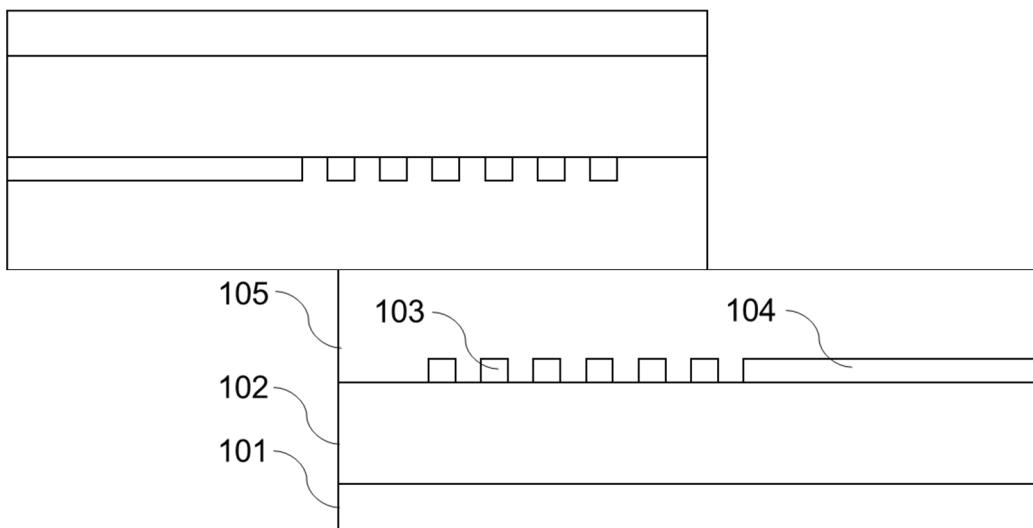


Fig. 1g

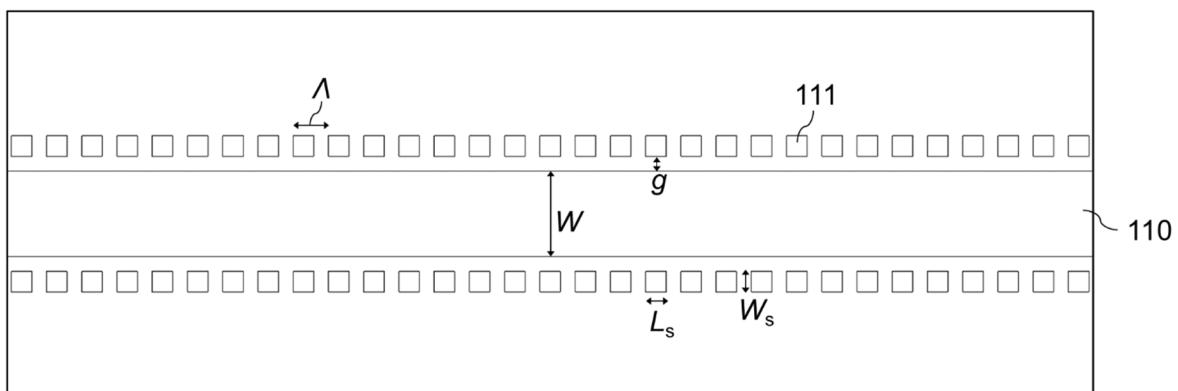


Fig. 1i

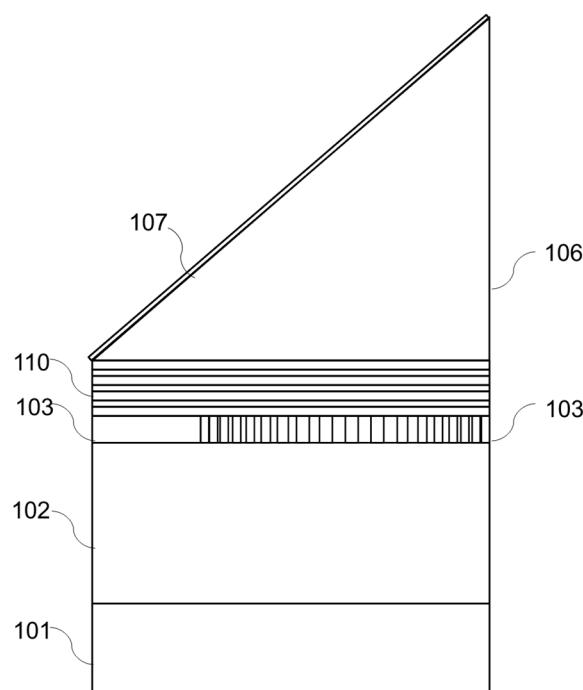


Fig. 1k

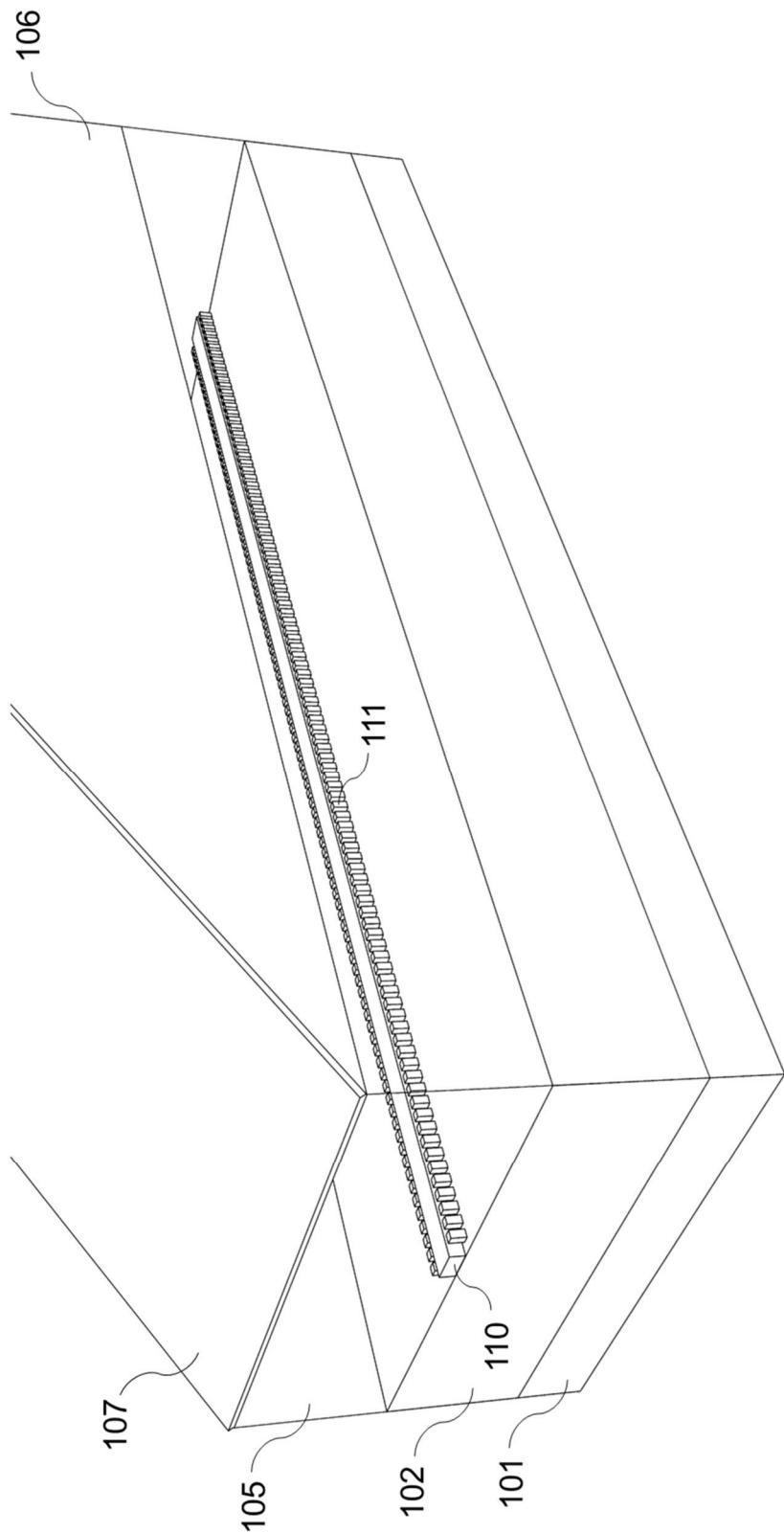


Fig. 1h

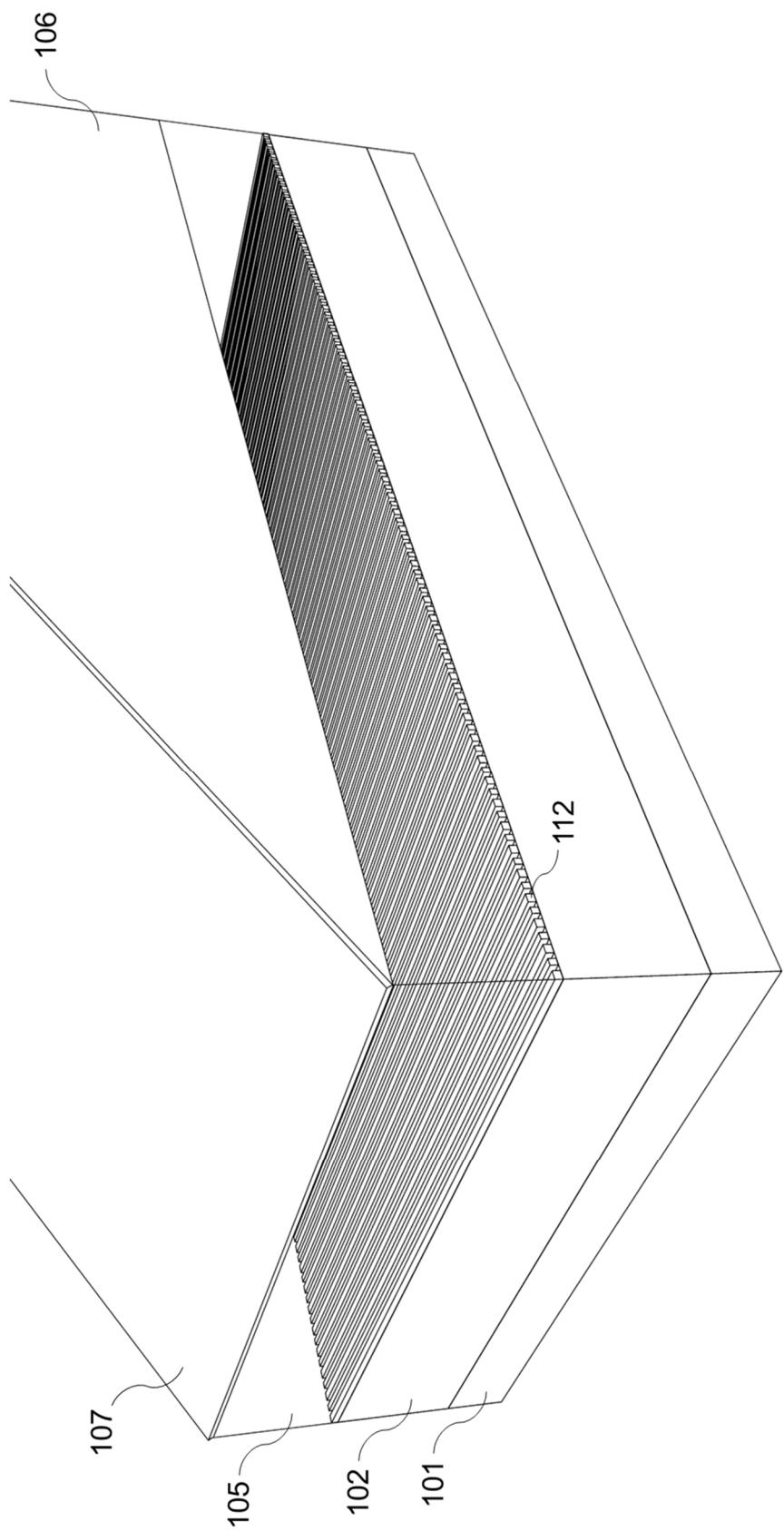


Fig. 1j

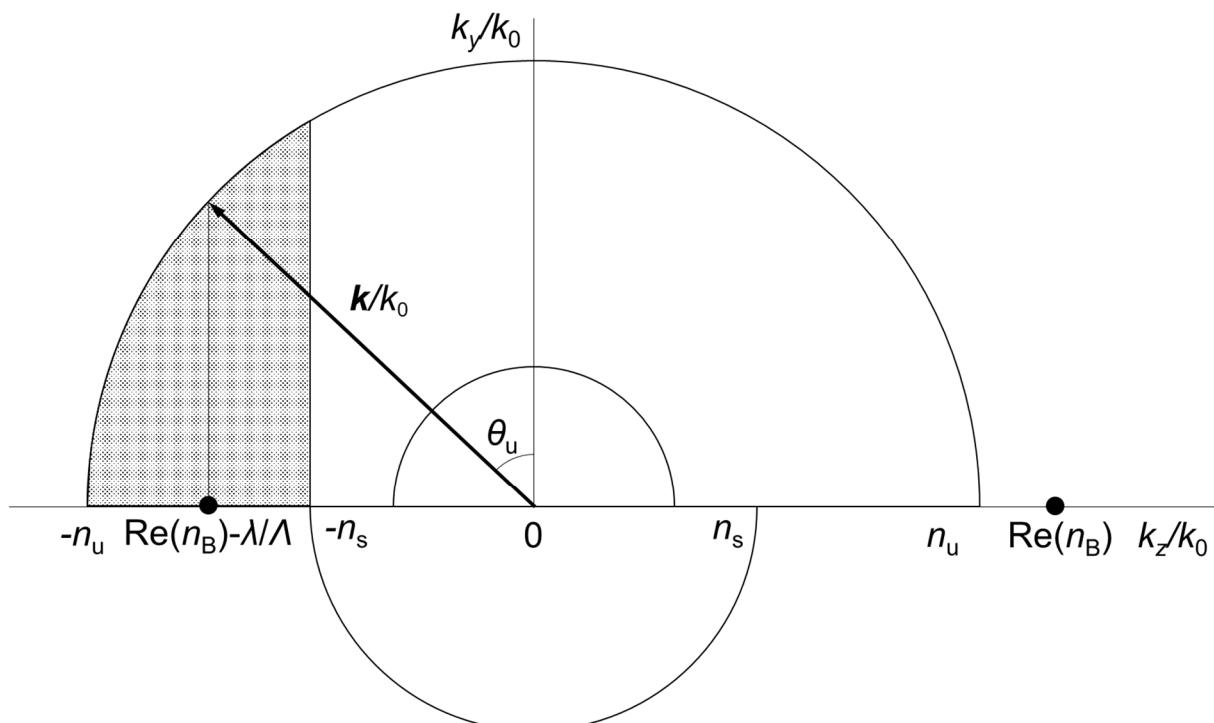


Fig. 2

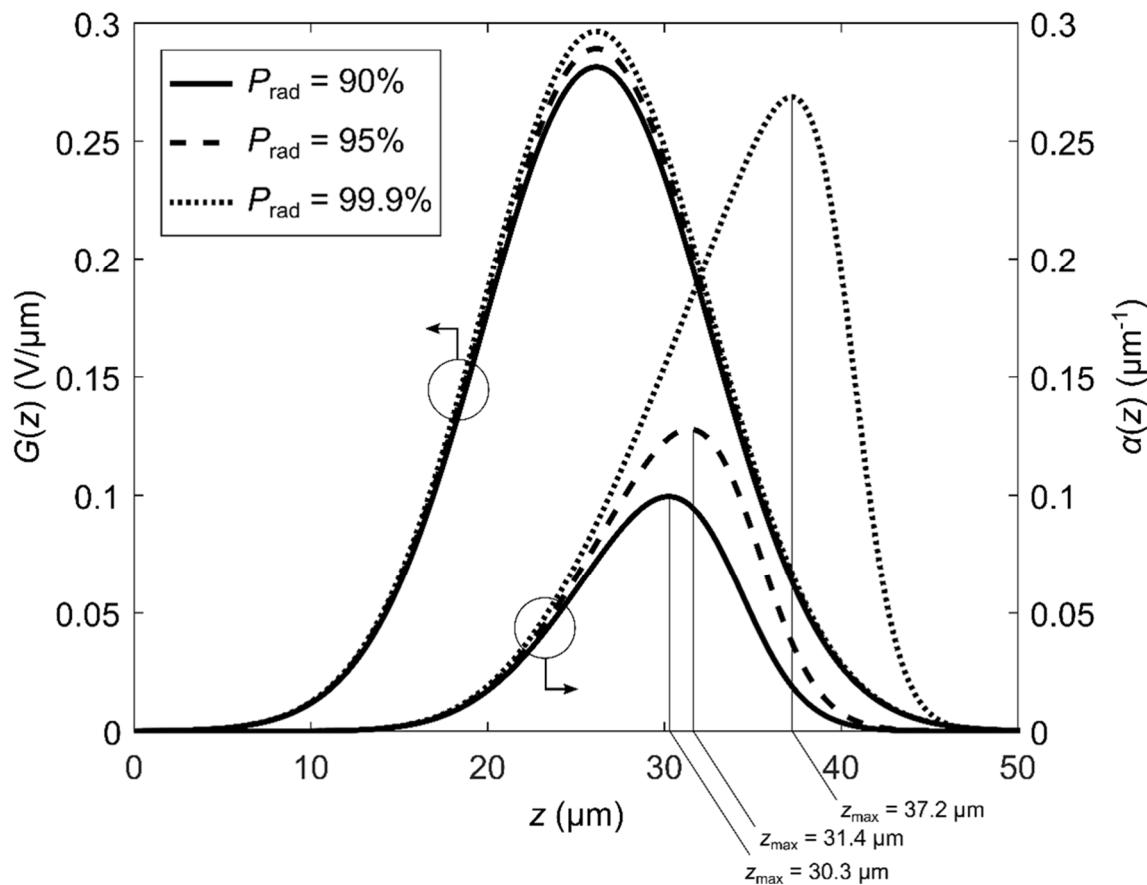


Fig. 3

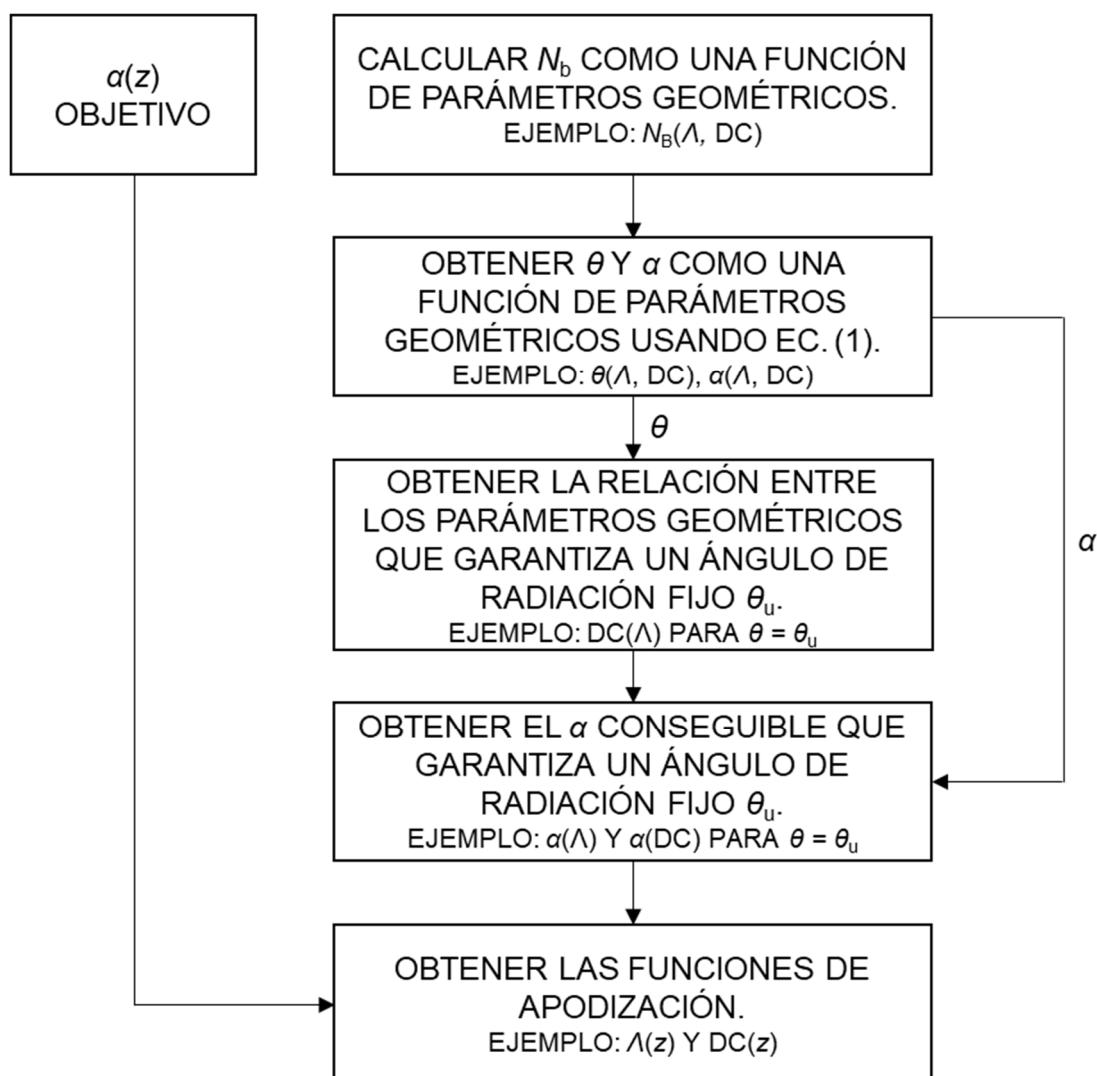
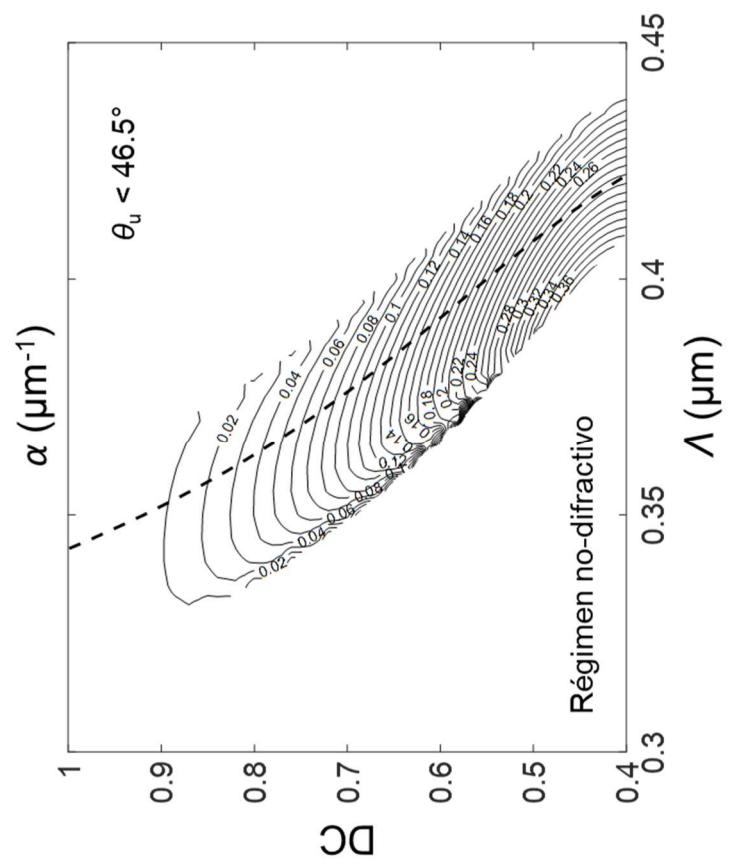
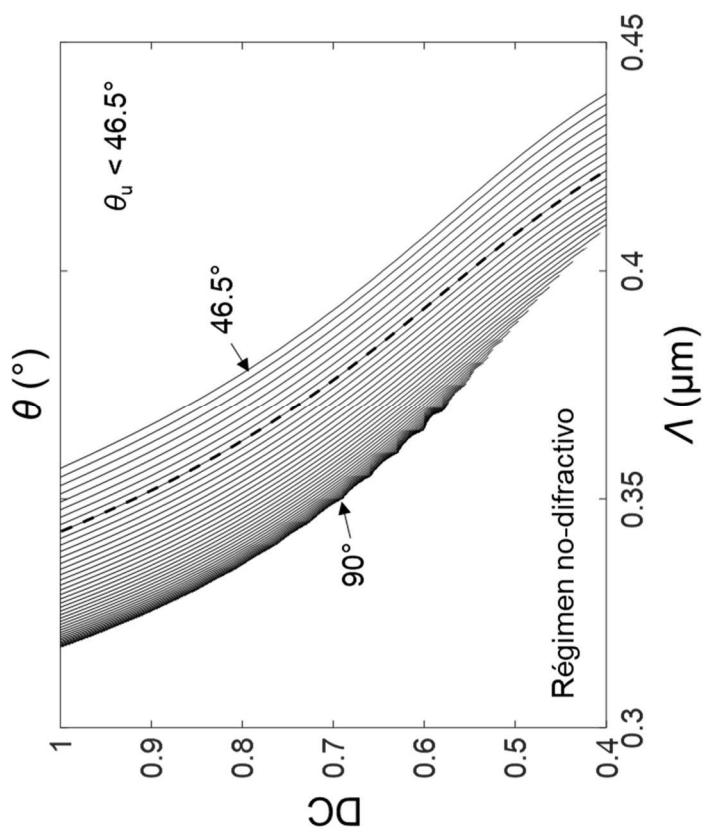


Fig. 4

Fig. 5b**Fig. 5a**

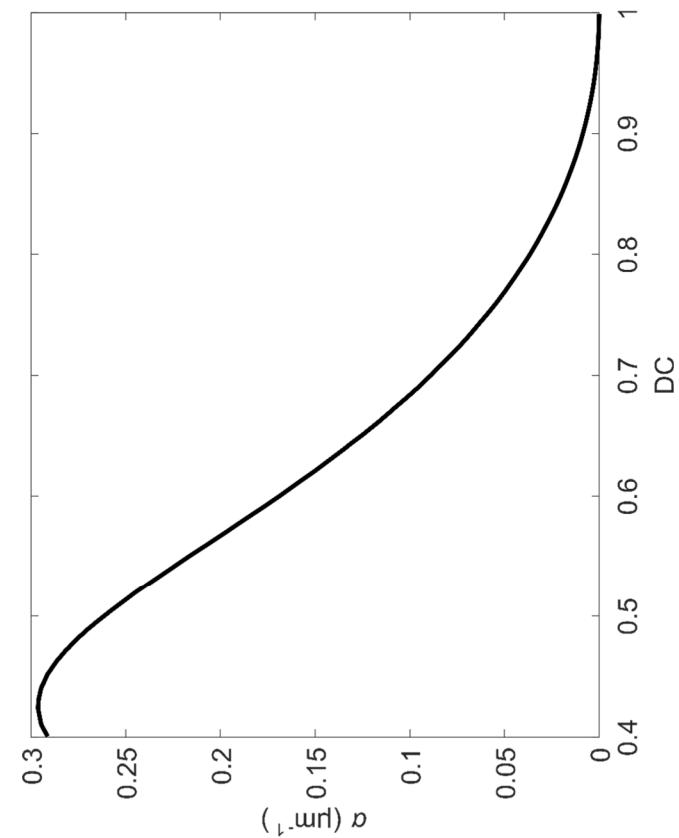


Fig. 5d

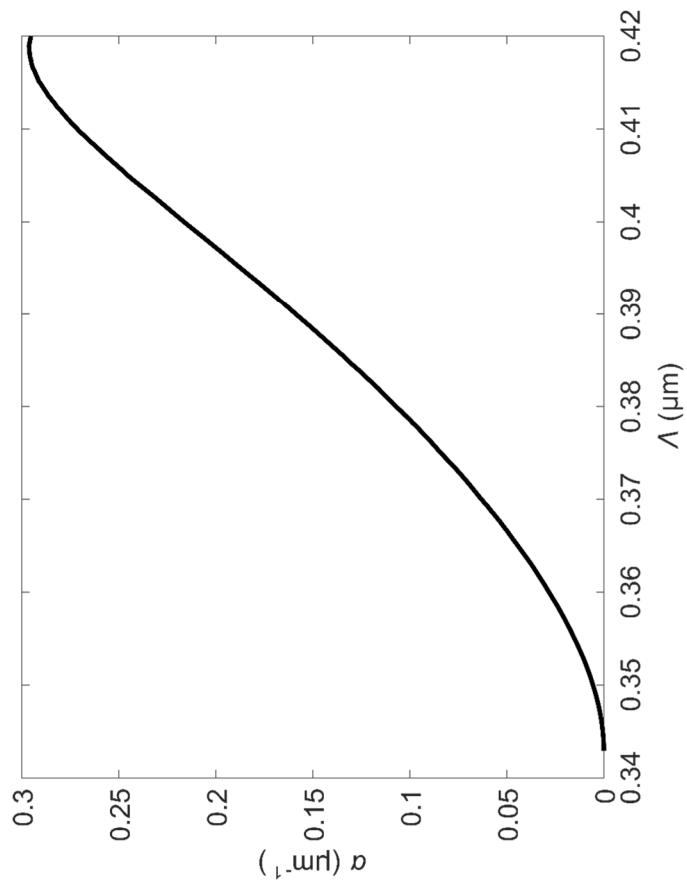
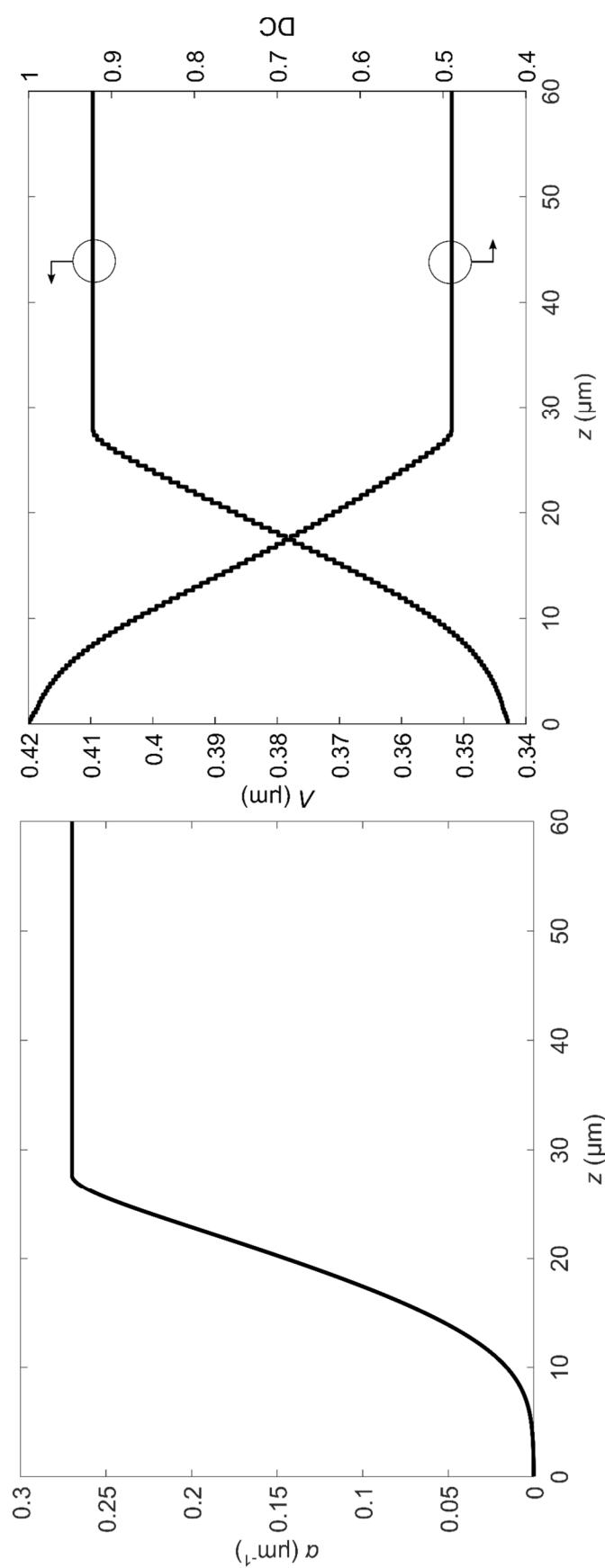
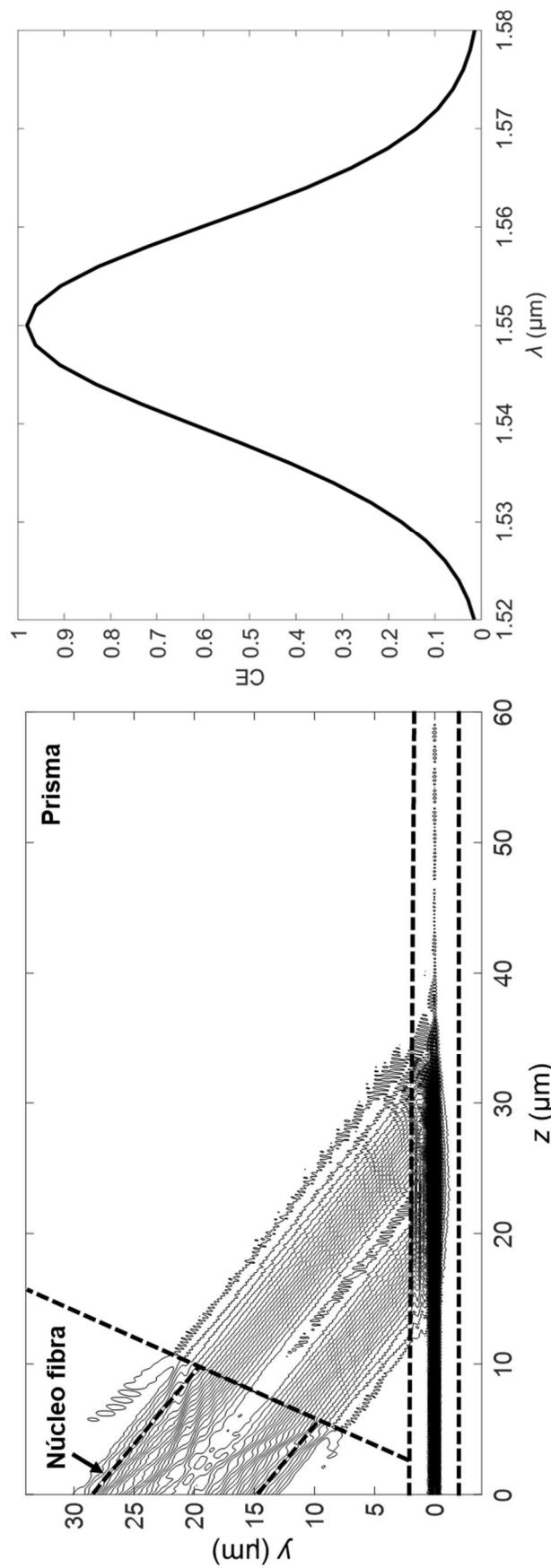
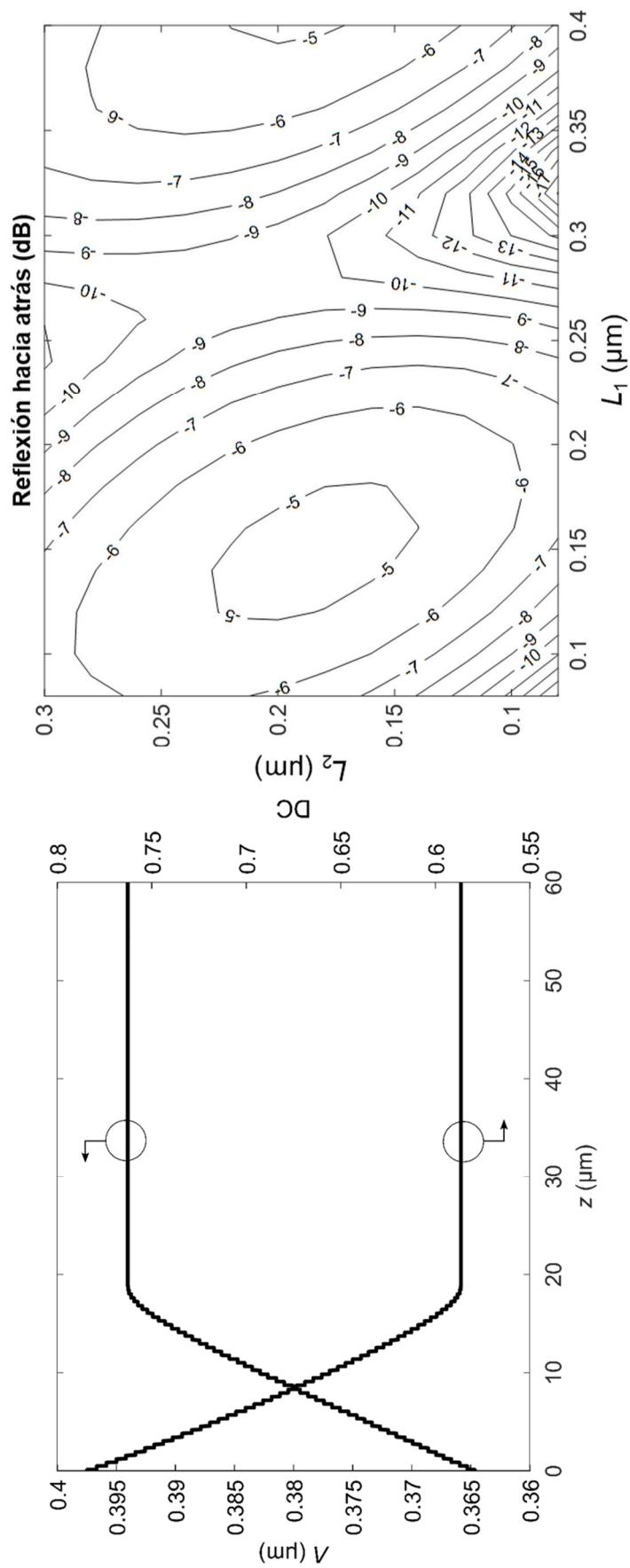


Fig. 5c

**Fig. 5f****Fig. 5e**





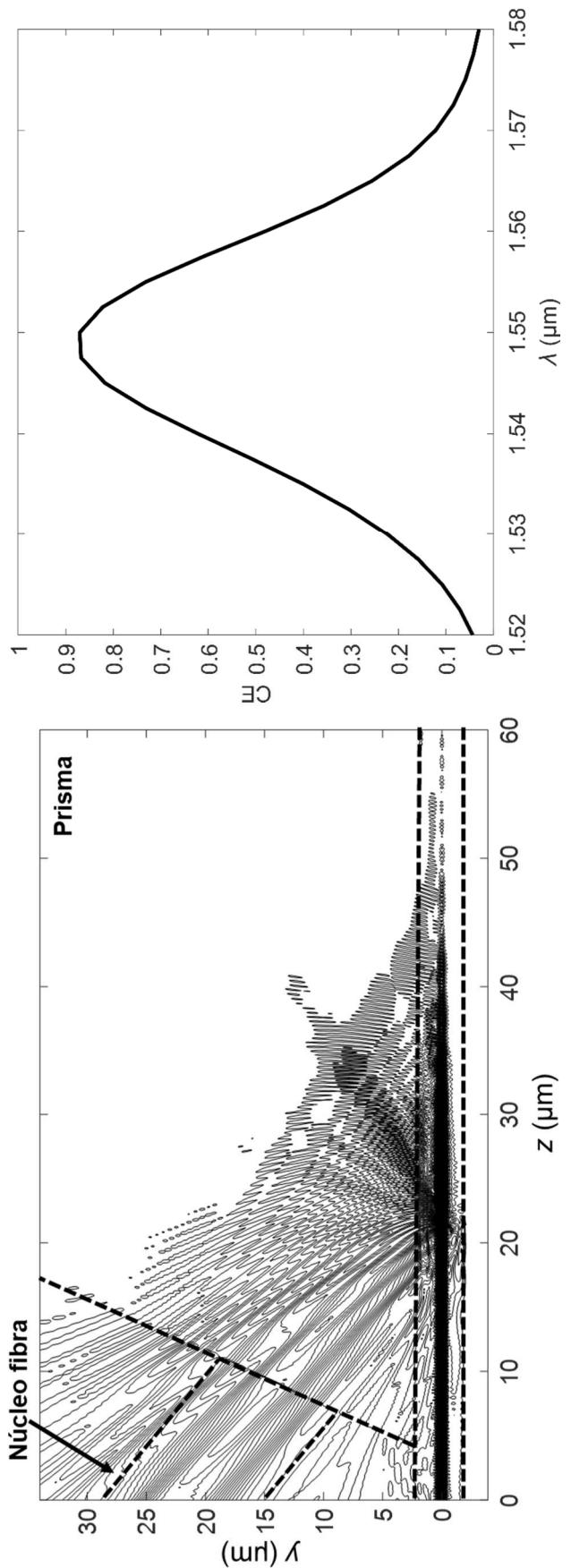


Fig. 7d

Fig. 7c

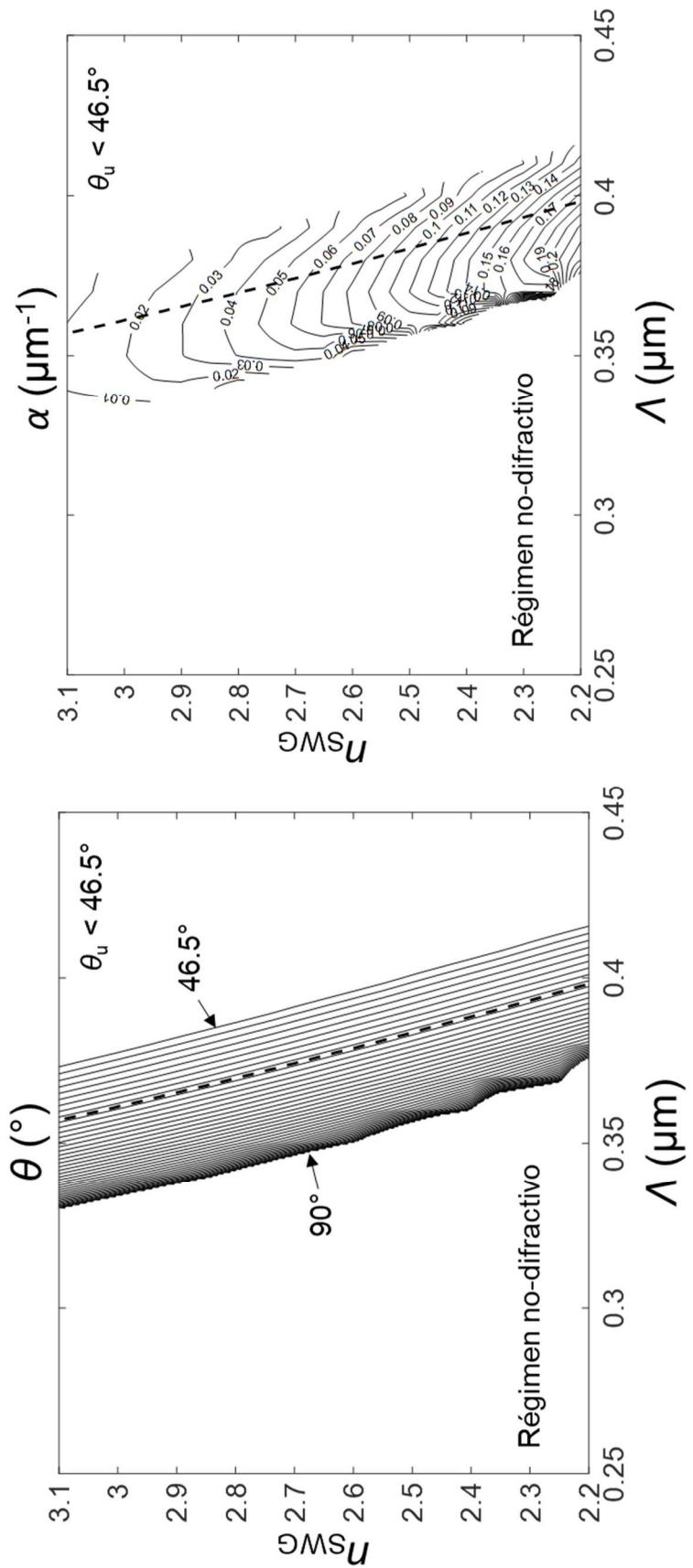
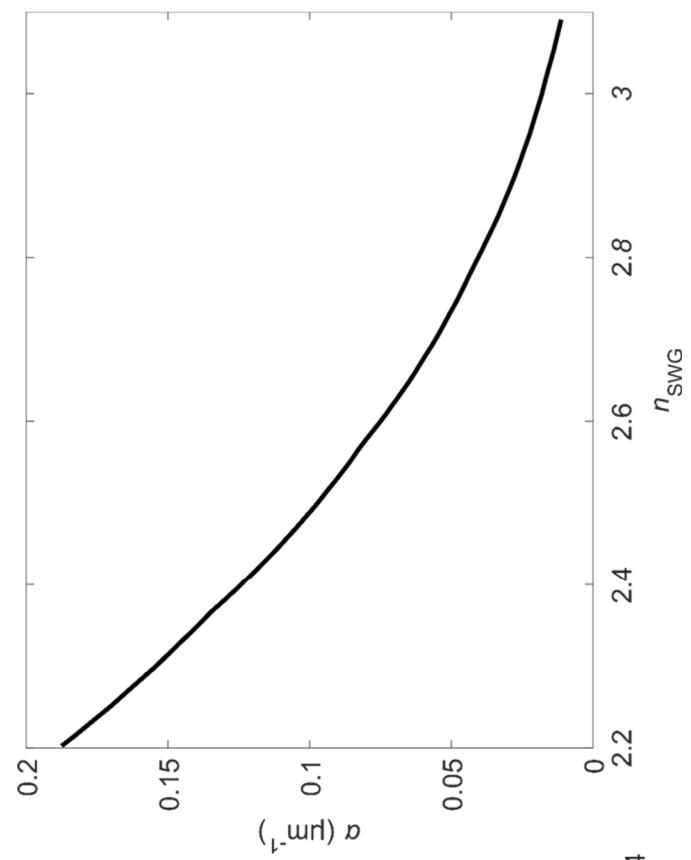
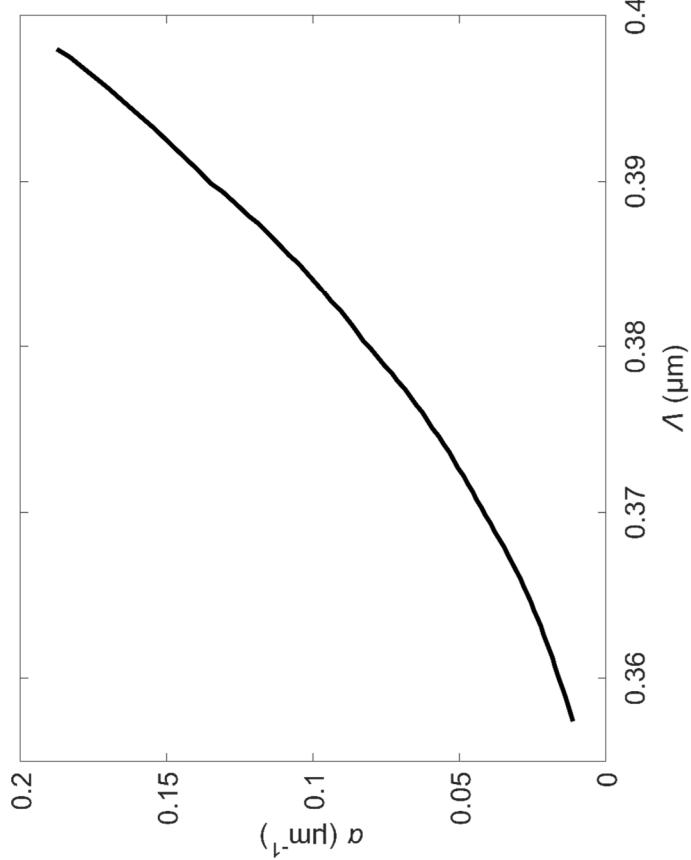
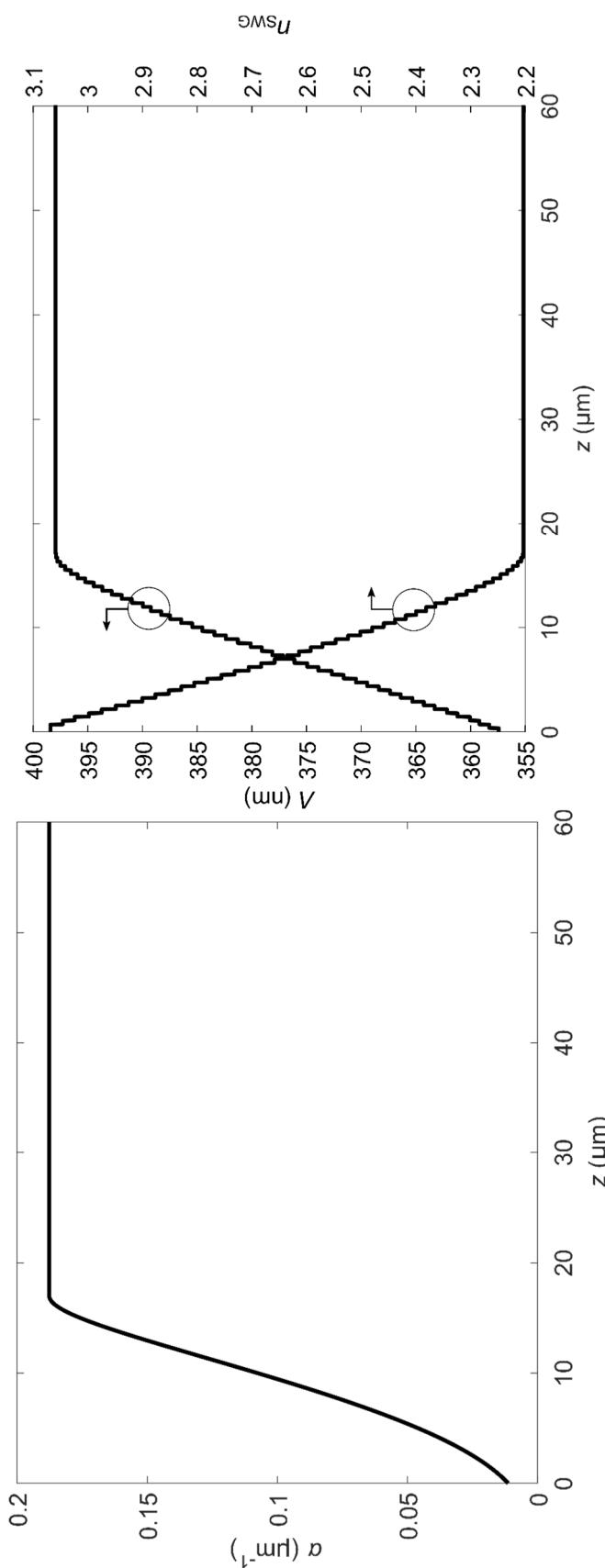
**Fig. 8b****Fig. 8a**

Fig. 8d**Fig. 8c**

**Fig. 8f****Fig. 8e**

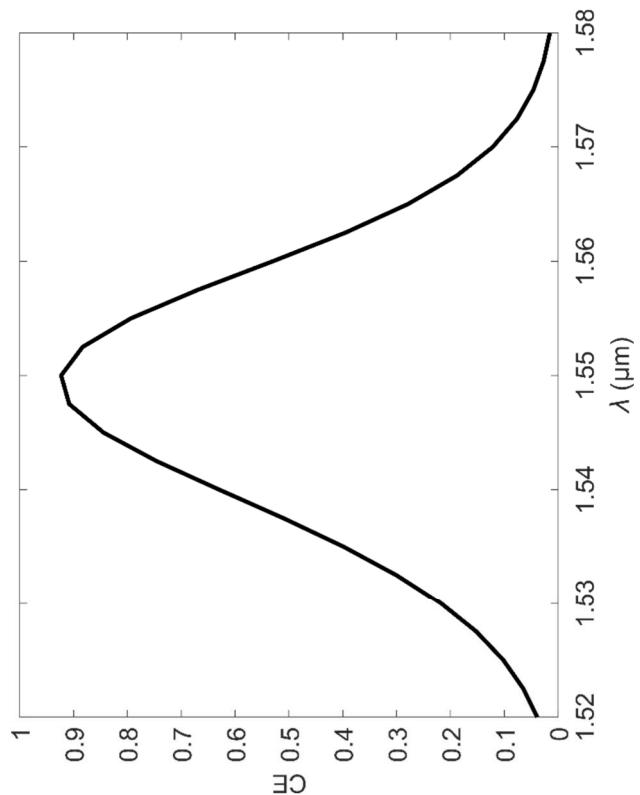


Fig. 8h

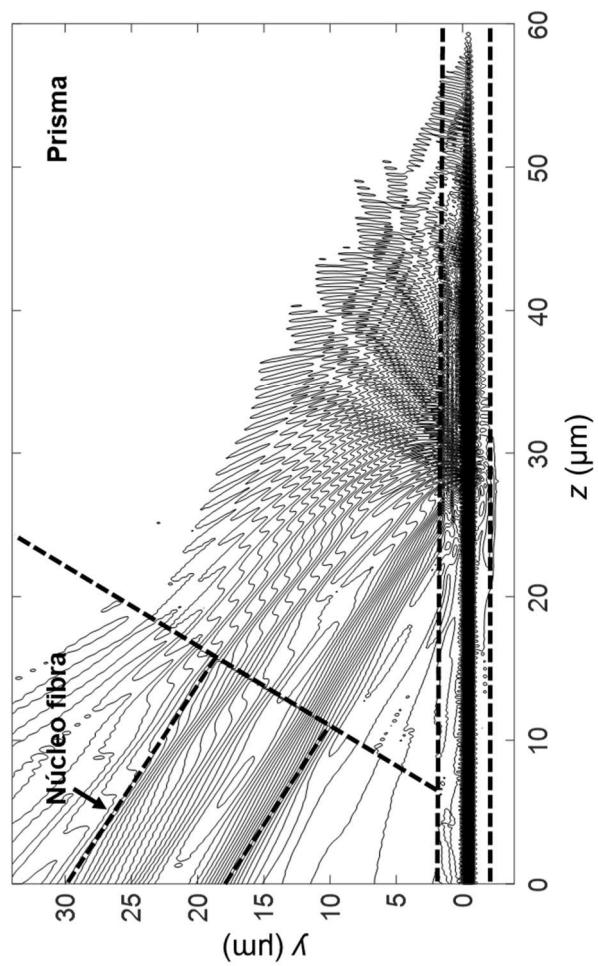


Fig. 8g

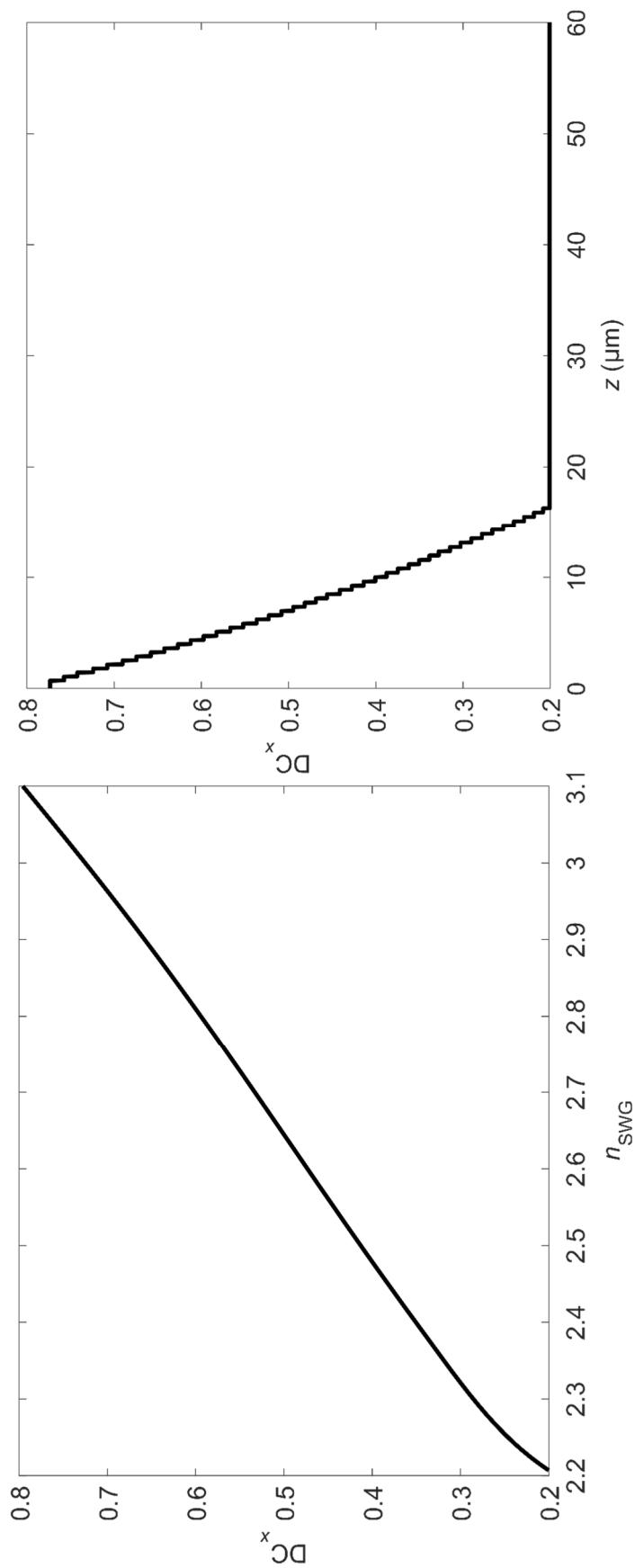
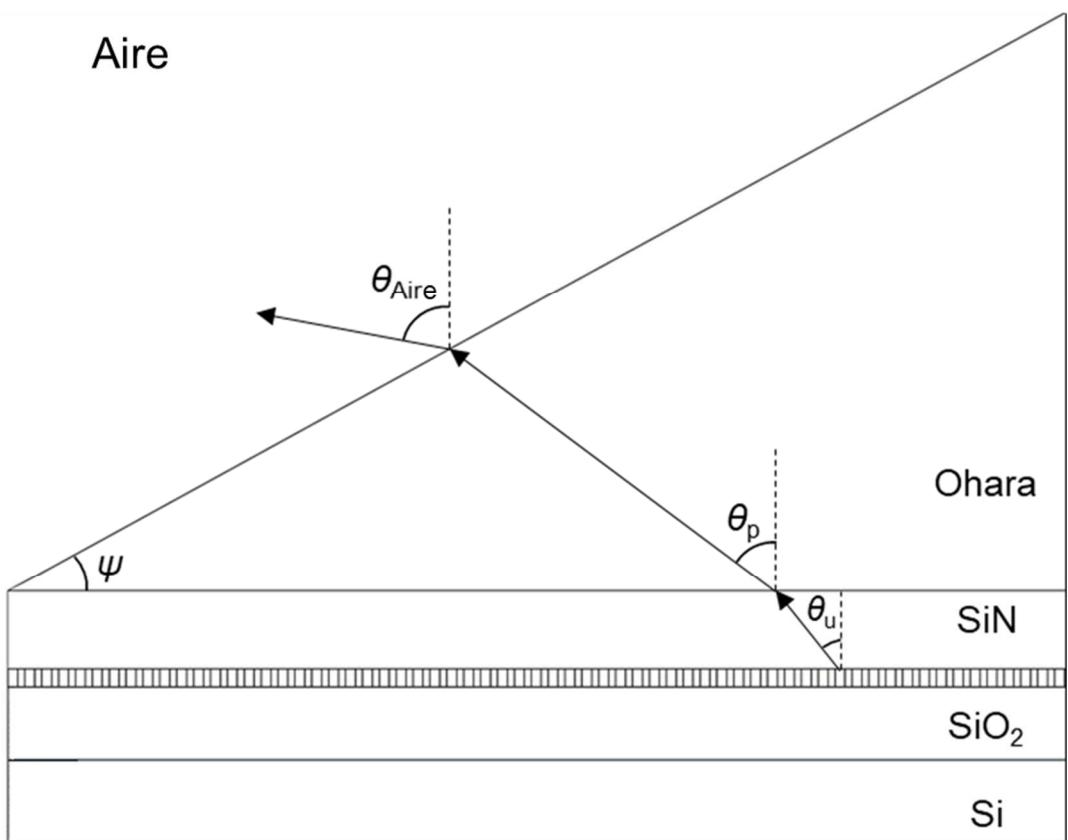
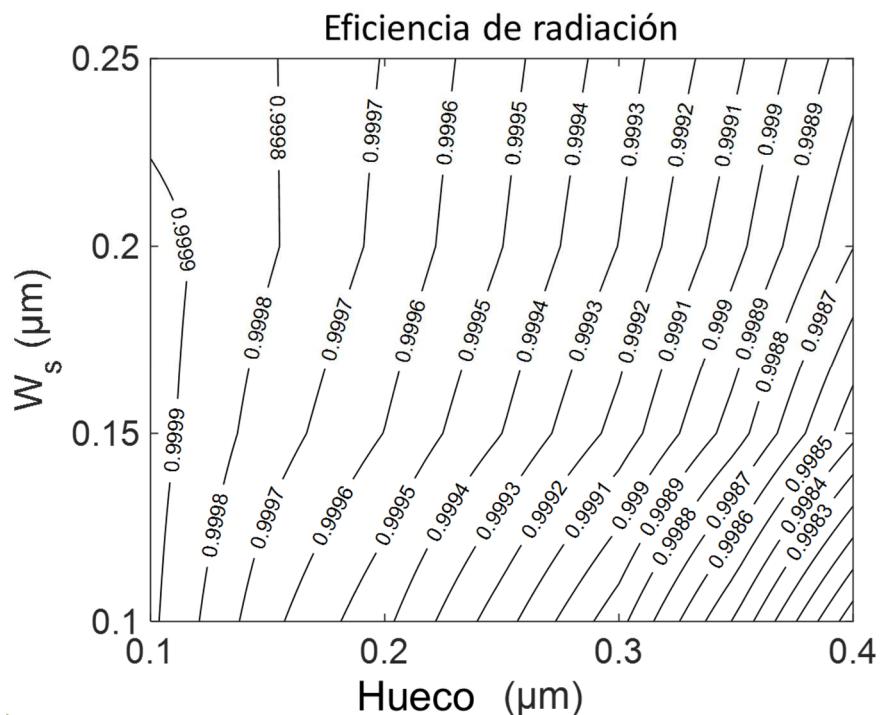


Fig. 8j

Fig. 8i

**Fig. 9****Fig. 11a**

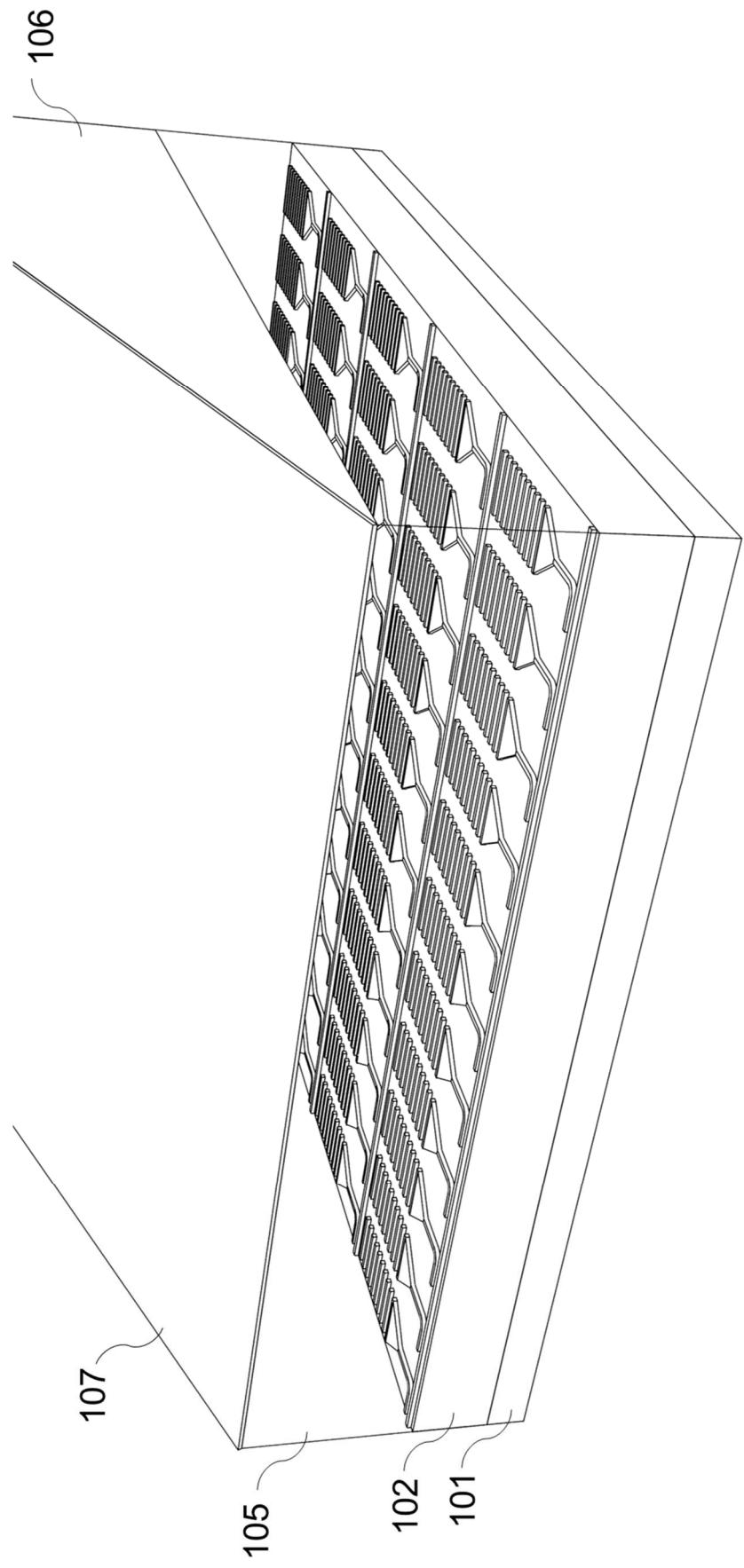
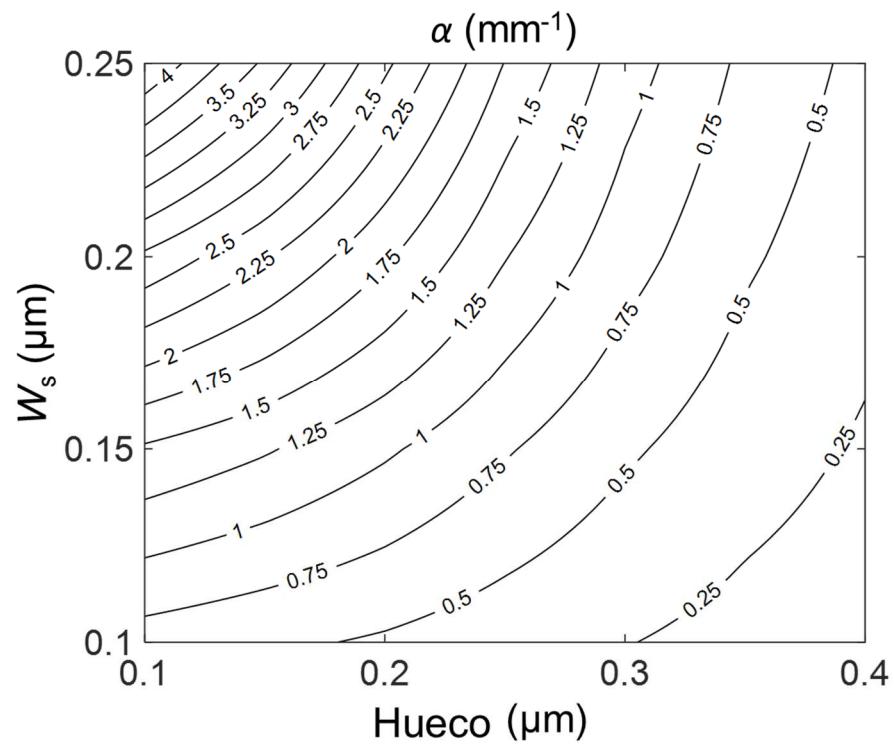
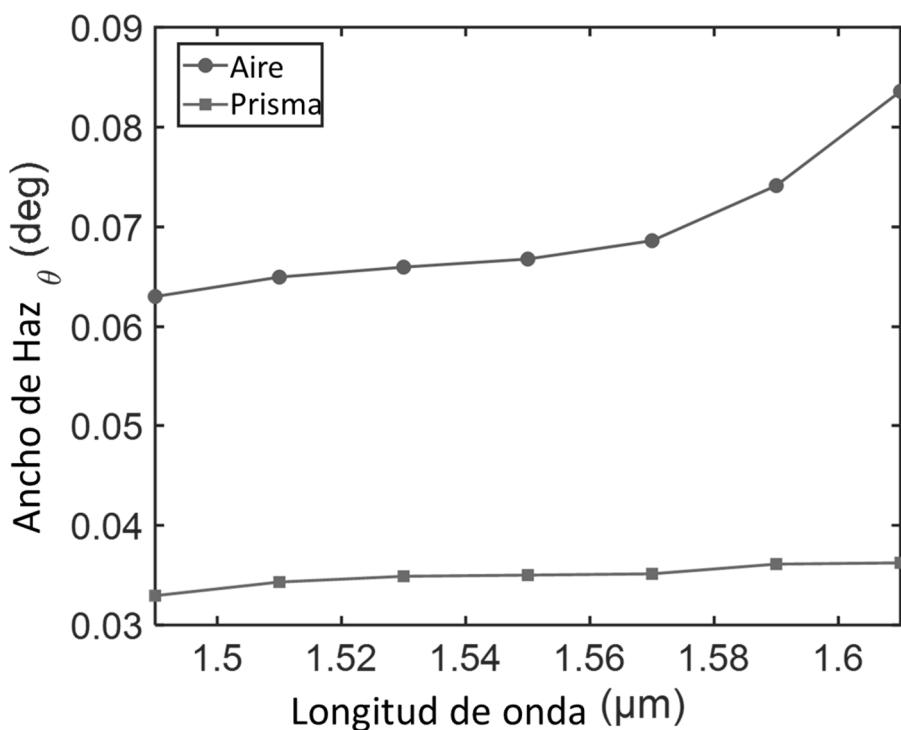
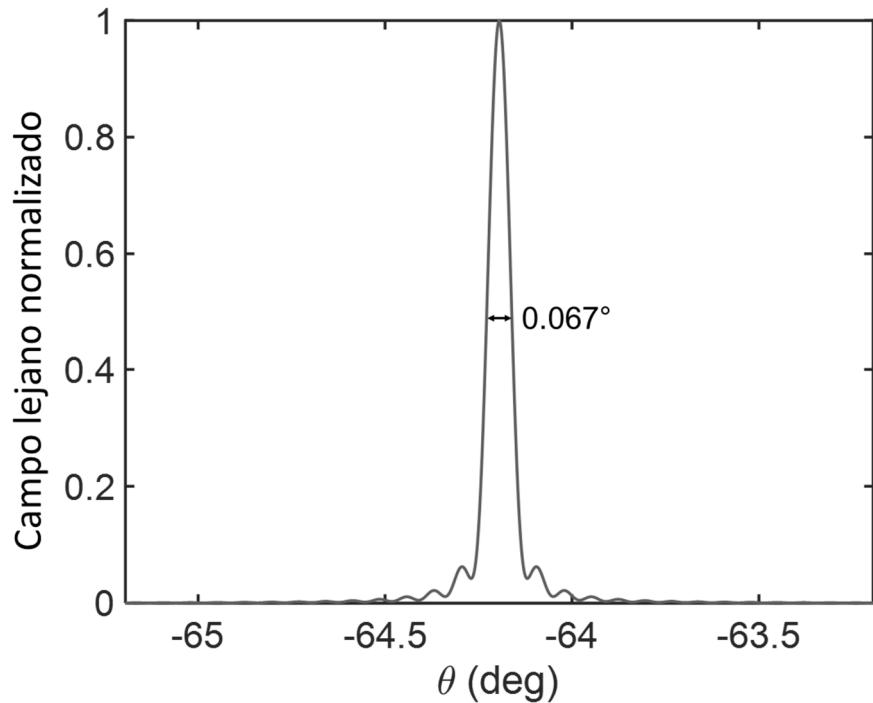
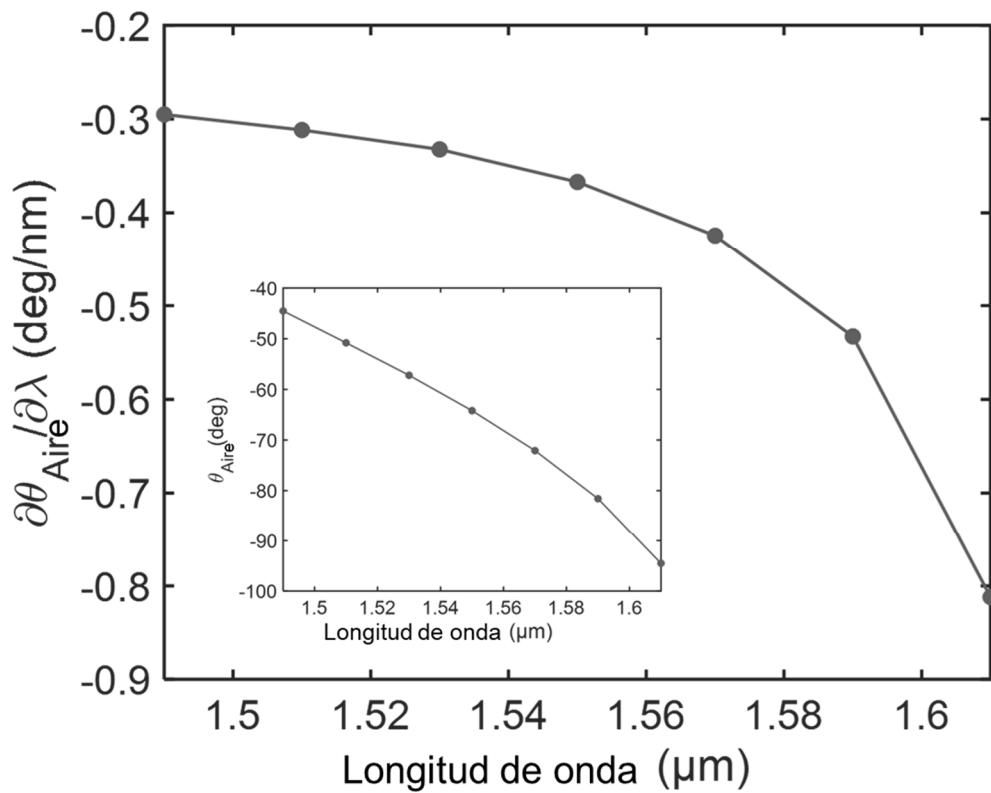


Fig. 10

**Fig. 11b****Fig. 12a**

**Fig. 12b****Fig. 13**

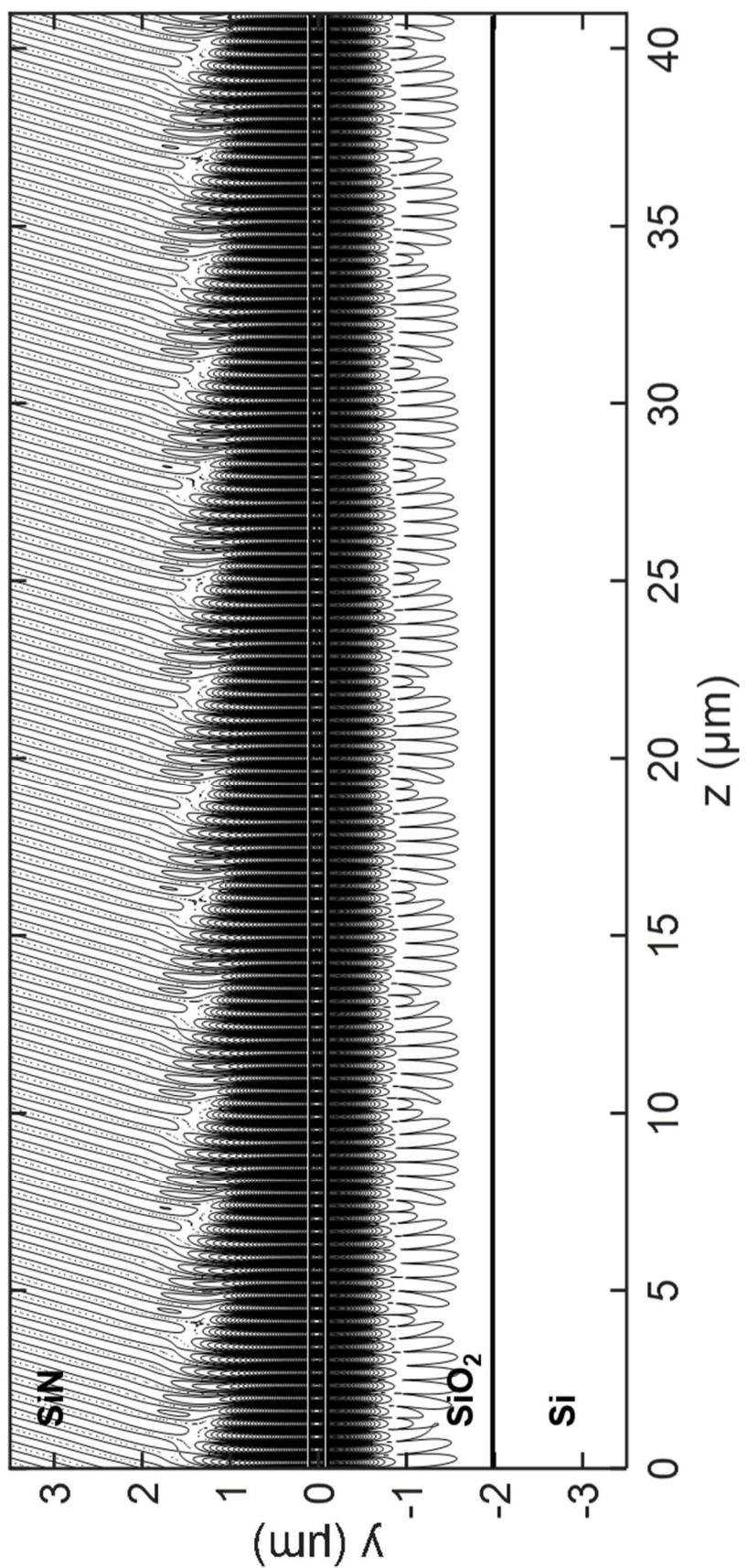


Fig. 12c

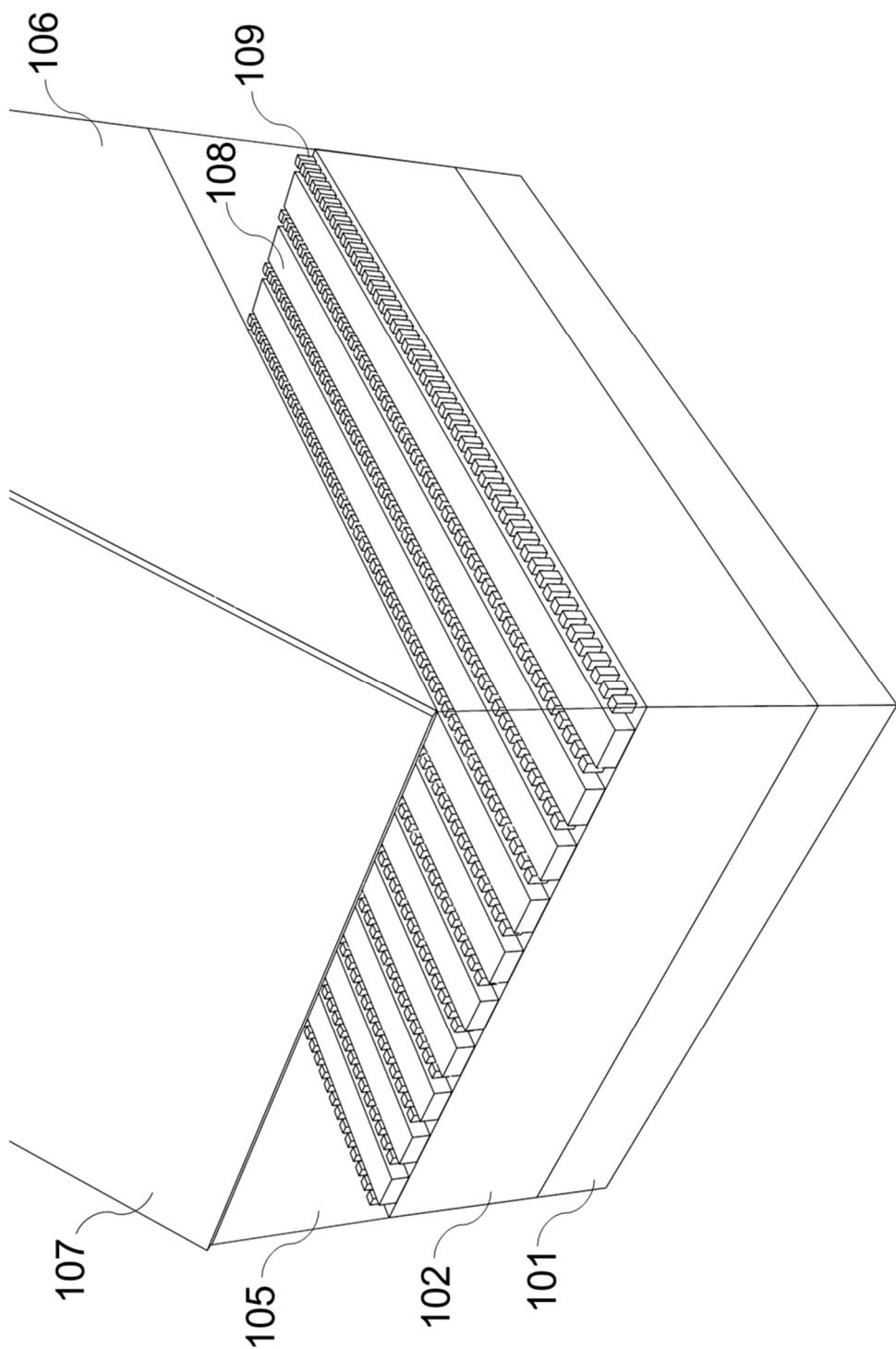


Fig. 14



OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 202330971

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 23.11.2023

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

(51) Int. Cl.: **G02B6/34** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	66	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	EP 4258050 A1 (UNIV MALAGA) 11/10/2023, resumen; párrafos [0001, 0004, 0005, 0030, 0040, 0042, 0066, 0078-0081, 0111]		1-5 6-40
Y	SHUYI LI et al.: "Deterministic design of focusing apodized subwavelength grating coupler based on weak form and transformation optics". Optics Express, 06/11/2020 [en línea][recuperado el 31/07/2024]. Recuperado de Internet <URL: https://www.researchgate.net/publication/346597128_Deterministic_design_of_focusing_apodized_subwavelength_grating_coupler_based_on_weak_form_and_transformation_optics >, <DOI: 10.1364/OE.409981>. figuras 1,10, apartado 5.		1-40
Y	WO 2022013779 A1 (NAT RES COUNCIL CANADA) 20/01/2022, resumen; figuras 1e, 8.		1-40
Y	DANIELE MELATI et al.: "Design of Compact and Efficient Silicon Photonic Micro Antennas With Perfectly Vertical Emission". IEEE, 31/07/2020 [en línea][recuperado el 31/07/2024]. Recuperado de Internet <URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9153900 >, <DOI: 10.1109/JSTQE.2020.3013532>. resumen; figura 1.		1-40

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 31.07.2024	Examinador F. J. Domínguez Gómez	Página 1/3
--	-------------------------------------	---------------



OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 202330971

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 23.11.2023

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

(51) Int. Cl.: **G02B6/34** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	56 Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	LIRONG CHENG et al.: "Grating Couplers on Silicon Photonics: Design Principles, Emerging Trends and Practical Issues". Micromachines, 08/07/2020 [en línea][recuperado el 31/07/2024]. Recuperado de Internet <URL: https://www.researchgate.net/publication/342796157_Grating_Couplers_on_Silicon_Photonics_Design_Principles_Emerging_Trends_and_Practical_Issues >, <DOI: 10.3390/mi11070666>. Todo el documento.	1-40

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 31.07.2024	Examinador F. J. Domínguez Gómez	Página 2/3
--	-------------------------------------	---------------

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

G02B

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

INVENES, EPODOC, WPI, IEEE, INSPEC, NPL