

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 833 122**

21 Número de solicitud: 201931104

51 Int. Cl.:

G02B 6/12 (2006.01)

G02B 5/28 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

11.12.2019

43 Fecha de publicación de la solicitud:

14.06.2021

Fecha de concesión:

26.01.2022

45 Fecha de publicación de la concesión:

02.02.2022

73 Titular/es:

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA (100.0%)

Avenida Cervantes, 2

29071 Málaga (Málaga) ES

72 Inventor/es:

MOLINA FERNÁNDEZ, Íñigo;

WANGUEMERT PÉREZ, Juan Gonzalo;

ORTEGA MOÑUX, Alejandro;

HALIR, Robert y

PEREIRA MARTÍN, Daniel

74 Agente/Representante:

SAN MARTÍN ALARCIA, Esther

54 Título: **Filtro óptico integrado basado en resonadores acoplados mediante redes Bragg fuertes de gran confinamiento lateral**

57 Resumen:

Filtro integrado basado en resonadores acoplados que comprende una guía de onda de entrada (1), una guía de onda de salida (7), una pluralidad de reflectores de Bragg (5), una pluralidad de cavidades Fabry-Perot (6), dos conversores modales (2) y una pluralidad de adaptadores (4). Los dos conversores modales (2) varían adiabáticamente entre la primera anchura (w_1) y a segunda anchura (w_2), mientras que la pluralidad de adaptadores (4) conectan la pluralidad de reflectores de Bragg (5) con la pluralidad de cavidades Fabry-Perot (6) y con los dos conversores modales (2), mediante secciones alternas con al menos dos índices efectivos diferentes. La segunda anchura (w_2) de la pluralidad de reflectores de Bragg (5) y su banda prohibida asociada facilitan la optimización del dispositivo respecto a otras soluciones basadas en guías estrechas y/o redes débiles, mejorando las prestaciones del filtro integrado.

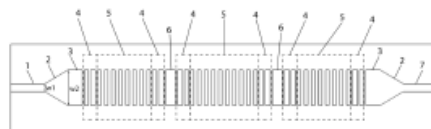


Fig. 1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 833 122 B2

DESCRIPCIÓN

Filtro óptico integrado basado en resonadores acoplados mediante redes Bragg fuertes de gran confinamiento lateral

5

Objeto de la invención

La presente invención se refiere al campo de óptica integrada, y más concretamente a un filtro basado en resonadores acoplados a través de redes de Bragg implementadas sobre guías de onda. El empleo de reflectores de Bragg fuertes y con gran confinamiento lateral permite simplificar el proceso de diseño, aumentar el rango espectral libre y reduciendo las pérdidas de radiación del dispositivo.

10

Antecedentes de la invención

15

Los circuitos de resonadores acoplados son bien conocidos en el ámbito de las microondas, donde han sido aplicados a diversas aplicaciones como filtros, diplexores, etc. Asimismo, han sido desarrolladas técnicas de diseño para adecuar la respuesta de dichos circuitos a una cierta respuesta objetivo. Los filtros ópticos de resonadores acoplados basado en guías de onda (CROW, del inglés "Coupled Resonator Optical Waveguides") responden a los mismos principios de funcionamiento y diseño, pero aplicados a las frecuencias ópticas.

20

Los filtros CROW comprenden un número N de resonadores ópticos acoplados entre sí. Cada uno de los resonadores es capaz de almacenar energía en un modo de oscilación propio, a una frecuencia de resonancia (f_i). Los resonadores se interconectan entre sí, de tal forma que intercambian su energía entre ellos. La tasa a la cual un resonador con un primer índice (i) y un resonador con un segundo índice (j) intercambian energía entre sí, se mide a través del factor de acoplo (k_{ij}). Los resonadores también se acoplan con las guías de entrada y/o salida, permitiendo así el intercambio de energía con el resto del circuito óptico. De acuerdo con lo conocido en el estado de la técnica, para reducir las pérdidas introducido por los filtros CROW, es necesario contar con resonadores cuyo factor de calidad (Q) interno sea mucho mayor que el inverso del ancho de banda fraccional del filtro, es decir, que la ratio entre la frecuencia central (f_c) y el ancho de banda (BW).

30

35

Nótese que las técnicas de cálculo de las frecuencias de resonancia (f_i) y los factores de acoplo (k_{ij}) para obtener una determinada respuesta frecuencial son sobradamente conocidas en el estado de la técnica, y pueden aplicarse de manera directa a la presente invención, por lo que no se detallan en el presente documento, centrándose por el
5 contrario en los elementos morfológicos diferenciales de los componentes de dichos filtros CROW.

Típicamente, los filtros ópticos de resonadores acoplados se realizan mediante dos alternativas: bien mediante resonadores en anillo, bien mediante resonadores basados
10 en reflectores de Bragg (también conocidos como “filtros de Bragg” o “redes de Bragg”). Los resonadores en anillo se utilizan frecuentemente en óptica integrada pero presentan algunos problemas como su reducida tolerancia a errores de fabricación y su respuesta en frecuencia periódica, con un rango espectral libre (FSR, del inglés “Free Spectral Range”) relativamente pequeño, lo que limita su aplicabilidad. US 7,356,221 B2 presenta
15 un ejemplo de filtro CROW basado en guías de onda en anillo, controlados termo-ópticamente mediante un conjunto de calentadores dispuestos sobre el chip.

Por su parte, los resonadores basados en reflectores de Bragg, en su versión más simple, son resonadores en los que la luz queda atrapada mediante dos espejos
20 formados por estructuras periódicas operando en zona de Bragg. Si la estructura periódica se implementa mediante una guía homogénea convencional a la que se introduce una perturbación periódica, se puede demostrar que el rango de longitudes de onda que satisfacen la condición de Bragg, depende de la intensidad de la interacción del campo electromagnético con la perturbación periódica. Este conjunto de longitudes
25 de onda que satisfacen la condición de Bragg se denomina banda prohibida (o más comúnmente, por su nombre en inglés “bandgap”). Cuanto más débil sea la interacción del campo electromagnético con la perturbación periódica, menor es el ancho de la banda prohibida y mayor el número de periodos que la onda penetra en la guía periódica antes de ser totalmente reflejada. Por el contrario, si se introducen perturbaciones
30 fuertes en la guía, el ancho de banda de la banda prohibida aumenta considerablemente y la profundidad de penetración de la luz en la estructura es de sólo unos pocos periodos. En los filtros Bragg, lo habitual es trabajar con el orden más bajo de la resonancia, lo que hace que su FSR sea mucho mayor que el de los anillos resonantes. Otra ventaja de los filtros Bragg es su gran flexibilidad para lograr el apodizado, es decir,
35 para la conformación espectral de una respuesta objetivo.

En la óptica integrada de Silicio, los filtros de Bragg conocidos en el estado de la técnica pueden dividirse según la fuerza del acoplo Bragg en débiles y fuertes. Si bien los valores concretos considerados débiles o fuertes puede cambiar dependiendo de la literatura particular considerada, para que dicha clasificación resulte más objetiva, en el presente texto se consideran redes de Bragg débiles aquellas en las que la relación entre el ancho de la banda prohibida y la longitud de onda central está por debajo de 0,1%, redes de Bragg de fuerza intermedia aquellas en las que la relación entre el ancho de la banda prohibida y la longitud de onda central está entre 0,1 % y 2,5 % y redes fuertes aquellas en las que la relación entre el ancho de la banda prohibida y la longitud de onda central supera 2,5%.

Los filtros de Bragg débiles se han planteado en óptica integrada como filtros de una única sección, aunque se conocen algunas propuestas basadas en resonadores acoplados. Los filtros fuertes y de fuerza intermedia han sido propuestos en algunas configuraciones con acoplo entre múltiples resonadores, si bien las prestaciones obtenidas todavía permiten un considerable margen de maniobra. Por ejemplo, US 5,600,740 A presenta un filtro Bragg débil de una única etapa, mencionándose las guías de onda como posible aplicación, si bien las geometrías propuestas son de difícil fabricación.

En otro ejemplo, EP 0,547,859 A1 presenta una estructura con múltiples fases de reflectores de Bragg acoplados que forman una estructura de luz lenta. Cada reflector de Bragg puede comprender etapas de adaptación para conectar dicho reflector a las guías de onda de entrada y salida, manteniéndose la anchura mayormente constante en todos estos elementos (guía de onda de entrada, etapas de adaptación, reflectores Bragg y guía de onda de salida), a excepción de pequeñas variaciones para sintonizar la respuesta de cada resonador en alguna de las opciones particulares planteadas.

De manera general, los filtros basados en una única red Bragg débil utilizan redes de elevada longitud para conseguir anchos de banda subnanométricos, entre otras funcionalidades. Sin embargo, el principal problema de las redes de Bragg débiles en guías de onda, y particularmente en tecnologías con base de silicio, es que resulta difícil controlar el bajo nivel de acoplo debido a que el alto contraste de índice de la plataforma dificulta su implementación práctica. Por ejemplo, si sobre una guía de silicio monomodo se realiza una red de Bragg mediante corrugaciones de anchura de la guía, para conseguir un ancho de banda de 0,8nm sería necesaria una corrugación en el ancho de

las guías de sólo 10nm, muy por debajo de la precisión alcanzable por las técnicas de fabricación actuales. Alternativamente, se ha propuesto implementar la variación periódica de índice de refracción de la red de Bragg mediante guías 'rib' de doble grabado o mediante tecnologías sub-longitud de onda, mejorando las posibilidades de fabricación, pero manteniendo limitaciones en términos de tamaño total del dispositivo, diafonía, rango espectral libre o energía necesaria para sintonizar técnicamente el dispositivo.

En cuanto a filtros basados en múltiples redes Bragg débiles, se conocen algunas soluciones implementadas en silicio sobre aislante. Si bien dichas soluciones tienen bajas pérdidas de radiación y por tanto consiguen pérdidas de inserción bajas y un elevado rechazo; mantienen no obstante la problemática de realizar corrugaciones laterales de pequeño tamaño sobre las guías de onda, así como la necesidad de recurrir a un número muy elevado de periodos (lo que aumenta el tamaño del dispositivo integrado), y las limitaciones de ancho de banda, impidiendo cubrir toda una banda de comunicaciones con el dispositivo.

Por otra parte, los reflectores de Bragg fuertes en óptica integrada permiten implementar bandas prohibidas asociadas de gran anchura, con el consiguiente incremento de FSR. También son extraordinariamente compactos, ya que la luz apenas necesita unos pocos periodos para ser totalmente reflejada. Además, usados en combinación con defectos sintonizados en el interior de la banda prohibida de los reflectores, permiten implementar cavidades resonantes de tipo Fabry-Perot de tamaño reducido. No obstante, esta alternativa presenta como principal inconveniente la dificultad de obtener una buena adaptación entre guías uniformes y guías con reflectores de Bragg, lo que ha limitado notablemente hasta ahora su aplicación práctica. La existencia de desadaptaciones entre guías uniformes y guías con reflectores de Bragg provoca pérdidas de radiación que disminuyen el factor de calidad intrínseco de los resonadores, e imposibilitan el diseño de filtros de alta calidad. En este último caso, la adaptación resulta crítica para conseguir implementar ventanas de transmisión sub-nanométricas en el interior del bandgap.

Para solucionar esta limitación, son conocidas en el estado de la técnica algunas estrategias para adaptar el modo de una guía uniforme al modo de una guía con un reflector de Bragg, de forma que se disminuyan las pérdidas de radiación y aumentar el factor de calidad interno del resonador. Por ejemplo, mediante estructuras periódicas

unidimensionales (con agujeros rectangulares y circulares) sobre guías de onda monomodo de silicio, es posible obtener elevados factores de acoplo en exceso de 5×10^5 , usando como transiciones entre las guías homogéneas y los reflectores de Bragg una sucesión de varias decenas de elementos cuasiperiodicos. No obstante, las

5 estructuras requeridas por estas soluciones son difícilmente fabricables, típicamente con agujeros de dimensiones en el límite o por debajo de los tamaños mínimos de rango (MFS, del inglés 'Minimum Feature Size') de las técnicas convencionales de fabricación de guías de onda. Además, la complejidad de la respuesta de estas estructuras y su

10 sensibilidad a errores de fabricación acarrea considerables dificultades a la hora de realizar diseños optimizados en los que se combinan múltiples etapas de reflectores de Bragg.

En definitiva, sigue existiendo por lo tanto en el estado de la técnica la necesidad de

15 filtros integrados en guías de onda, compactos y de fácil fabricación, que proporcionen una respuesta espectral de alta calidad en un rango espectral libre de gran anchura.

Descripción de la invención

La presente invención soluciona los problemas anteriormente descritos mediante un

20 filtro integrado basado en resonadores acoplados, en el que la elevada anchura y banda prohibida asociada de los reflectores de Bragg reduce el número de periodos necesarios para implementar los reflectores, facilita la optimización del dispositivo respecto a otras soluciones basadas en guías estrechas y/o redes débiles, y mejora las prestaciones del

25 filtro integrado resultante en un elevado rango espectral libre.

Nótese que en todo el presente documento, los términos "filtro", "filtrar" y otros derivados no se refieren exclusivamente a su acepción de "seleccionar una región espectral", sino a su acepciones en sentido amplio que incluyen dicha función, pero también cualquier

30 otro procesamiento de señal realizable por este tipo de dispositivos, como por ejemplo, la ecualización de fase o la implementación de retardos, entre otras.

El filtro integrado comprende los siguientes elementos:

- Una guía de onda de entrada y una guía de onda de salida, ambas monomodo

35 y con una primera anchura típicamente igual para ambas. El filtro está adaptado para recibir por la guía de onda de entrada una señal óptica a filtrar con una

longitud de onda central y una polarización, preferentemente correspondiente a un modo transversal eléctrico. Las guías de onda de entrada y salida, así como el resto de elementos de guía de onda del filtro están preferentemente implementadas en una plataforma seleccionada de entre silicio sobre aislante y nitruro de silicio.

5

- Una pluralidad de reflectores de Bragg con una segunda anchura, mayor a la primera anchura, y cuya sección presenta secciones transversales de forma rectangular sin discontinuidades. Es decir, se trata de reflectores de Bragg con estructura lateral simplificada, que pueden comprender variaciones de anchura y/o de índice efectivo y/o de profundidad de grabado a lo largo de cada reflector, pero que no comprenden estructuras asociadas a cristales fotónicos bidimensionales. De acuerdo con sendas opciones preferentes, la pluralidad de reflectores Bragg puede estar implementada mediante guías de onda homogéneas o mediante estructuras sub-longitud de onda. Es decir, cuando los reflectores Bragg se implementan mediante estructuras sub-longitud de onda, dichos reflectores comprenden una disposición alterna de una pluralidad de secciones de un material de núcleo y una pluralidad de secciones de material de cobertura, con un periodo menor que la longitud de onda de la luz guiada por dicha guía de onda de birrefringencia modificada.

10

15

20

Preferentemente, la segunda anchura de la pluralidad de reflectores de Bragg es suficientemente grande como para presentar un nivel muy alto de confinamiento lateral. Es decir, una guía de onda con dicha segunda anchura (con la misma altura y materiales utilizados en la pluralidad de reflectores de Bragg, y a la misma longitud de onda central de la señal óptica a filtrar), da lugar a un índice efectivo que se diferencia menos de un primer umbral respecto al índice efectivo generado por una guía de onda equivalente con una anchura infinita. Es decir, los reflectores de Bragg actúan mayormente como redes unidimensionales, admitiéndose variaciones respecto a este comportamiento ideal definidas por dicho primer umbral. Preferentemente, dicho primer umbral es menor de 1%, aunque puede reducirse, más preferentemente, por debajo de 0,25% para acercarse aún más a dicho comportamiento unidimensional.

25

30

35

Por ejemplo, para el caso de filtros en banda C implementados en silicio sobre aislante, estas condiciones sobre la segunda anchura de la pluralidad de

reflectores de Bragg se traducen típicamente en valores de dicha segunda anchura mayores de 3,5 micras (umbral por debajo del 0.25%), si bien los límites particulares de dichos valores dependen de la longitud de onda central, la altura de la capa de material de núcleo, el material de cobertura, etc. De la misma manera, para el caso de filtros en banda C implementados en nitruro de silicio, las condiciones sobre la segunda anchura de la pluralidad de reflectores de Bragg se traducen típicamente en valores de dicha segunda anchura mayores de 6 micras (umbral por debajo del 0.25%), si bien los límites particulares de dichos valores dependen del resto de factores de diseño mencionados.

Preferentemente, la pluralidad de reflectores de Bragg tiene una banda prohibida asociada (más conocida como 'bandgap') que supone una proporción mayor de un primer umbral respecto a la longitud de onda central del filtro. Es decir, la ratio entre el ancho de la banda prohibida y la longitud de onda central es mayor que dicho primer umbral. Preferentemente, dicho primer umbral es mayor de 1,5%, y más preferentemente, mayor de 2,5%, cubriendo así típicamente una banda de comunicaciones ópticas completa.

Nótese que la banda prohibida asociada queda unívocamente determinada por la diferencia de índice periódicamente implementada sobre el reflector de Bragg, es decir, por la diferencia entre el máximo y el mínimo índice efectivo observable por la luz propagada por dicho reflector de Bragg. Es decir, dados unos determinados materiales de núcleo, cobertura y sustrato, la ratio entre el ancho de la banda prohibida y la longitud de onda central de un reflector de Bragg debe entenderse como una imposición sobre la morfología del reflector, cuya aplicación particular depende de la forma particular en la que se sintoniza dicho reflector.

Es decir, cada reflector de Bragg presenta una primera altura y una primera longitud en una pluralidad segmentos que presentan dicho máximo índice efectivo y una segunda altura y una segunda longitud en los segmentos que presentan dicho mínimo índice efectivo, estando dichas primera altura, primera longitud, segunda altura y segunda longitud adaptadas para generar las proporciones mencionadas entre la banda prohibida y la longitud de onda central, de acuerdo con lo conocido de manera general en el estado de la técnica para el diseño de redes de Bragg.

- Dependiendo de la realización particular, la pluralidad de reflectores de Bragg puede estar realizada mediante grabado completo (más conocido por su nomenclatura en inglés "full etch") o mediante grabado parcial o de varias profundidades. Es decir, cada reflector de Bragg comprende una pluralidad de segmentos de guía de onda de la segunda anchura dispuestos periódicamente, de modo que en el espacio entre dos segmentos consecutivos, la guía de onda puede estar grabada hasta el sustrato, por lo que se elimina todo el material de núcleo de ese espacio; o bien puede estar grabada parcialmente, conservándose material de núcleo con una altura menor a la de la pluralidad de segmentos mencionada. De acuerdo con sendas opciones preferentes, la pluralidad de reflectores de Bragg puede estar implementado mediante guías de onda homogéneas o mediante estructuras sub-longitud de onda. Es decir, cuando los reflectores de Bragg se implementan mediante estructuras sub-longitud de onda, dichos reflectores comprenden una disposición alterna de una pluralidad de secciones de un material de núcleo y una pluralidad de secciones de material de cobertura, con un periodo menor que la longitud de onda de la luz guiada por dicha guía de onda..
- En caso de implementarse mediante estructuras sub-longitud de onda, los reflectores de Bragg presentan la ventaja adicional de que es posible ajustar el ancho de la banda prohibida a valores cercanos al primer umbral mediante una geometría de fácil fabricación que solo usa un paso de grabado.
- Asimismo, se contemplan cuatro maneras preferentes de sintonizar la pluralidad de reflectores de Bragg: mediante variaciones de la profundidad de grabado de cada reflector de Bragg (es decir, un mismo reflector mantiene una profundidad de grabado constante, pero que puede cambiar entre reflectores), mediante variaciones del número de periodos de cada reflector de Bragg, mediante variaciones del periodo de cada reflector de Bragg (es decir, un mismo reflector mantiene un periodo constante, pero que puede cambiar entre reflectores), o mediante la variación del índice efectivo sintetizada por la estructura sub-longitud de onda.
- El caso particular en el que se utilizan variaciones del periodo para sintonizar la pluralidad de reflectores de Bragg (es decir, reflectores de Bragg con diferentes

frecuencias centrales) permite ajustar la fuerza de acoplo entre cavidades Fabry-Perot mediante des-sintonización de los reflectores de Bragg. Esta opción resulta preferente para el caso de usar grabación completa hasta el sustrato, puesto que en ese caso los reflectores de Bragg son tan fuertes que una diferencia de un periodo puede generar errores significativos de discretización.

5

- Una pluralidad de cavidades Fabry-Perot (también denominadas “defectos”) dispuesta alternamente entre la pluralidad de reflectores de Bragg, preferentemente sintonizados mediante una pluralidad de controladores que sintonizan su índice efectivo, por ejemplo mediante control térmico. De acuerdo con sendas opciones preferentes, la pluralidad de cavidades Fabry-Perot puede estar implementada mediante guías de onda homogéneas o mediante estructuras sub-longitud de onda. Es decir, cuando las cavidades Fabry-Perot se implementan mediante estructuras sub-longitud de onda, dichas cavidades comprenden una disposición alterna de una pluralidad de secciones de un material de núcleo y una pluralidad de secciones de material de cobertura, con un periodo menor que la longitud de onda de la luz guiada por dicha guía de onda.

10

15

20

25

30

35

- Dos conversores modales cuyo ancho varía entre la primera anchura y la segunda anchura. Es decir, un primer conversor modal conecta (directamente o a través de elementos adicionales) la guía de onda de entrada con un primer extremo del conjunto formado por la pluralidad de reflectores de Bragg, la pluralidad de cavidades Fabry-Perot y una pluralidad de adaptadores (descritos a continuación), mientras que un segundo conversor modal conecta (directamente o a través de elementos adicionales) la guía de onda de salida con un segundo extremo del conjunto (opuesto al primer conjunto). La transición adiabática de los dos conversores permite que, a pesar de que la segunda anchura de la pluralidad de reflectores de Bragg soporte más de un modo óptico, los modos de orden uno o mayor no se exciten, y por lo tanto, sobre dicha pluralidad de reflectores de Bragg sólo se propague el modo transversal eléctrico de orden cero. La geometría particular de los conversores modales puede variar de una realización a otra, de acuerdo con lo conocido de manera general en el estado de la técnica, siendo su realización más sencilla sendos trapecios, simétricos entre sí respecto a un plano perpendicular a la dirección de propagación de la señal óptica. Los conversores modales pueden estar

implementados mediante guías de onda homogéneas o mediante estructuras sub-longitud de onda. En este caso, el uso de estructuras sub-longitud de onda permite un mayor grado de libertad de diseño y una reducción de los efectos de errores de fabricación.

5

- La pluralidad de adaptadores mencionada, que conectan la pluralidad de reflectores de Bragg con la pluralidad de cavidades Fabry-Perot y con los dos conversores modales. Es decir, hay un adaptador entre cada cavidad Fabry-Perot y los dos reflectores de Bragg adyacentes, otro adaptador entre el primer conversor modal y el primer reflector de Bragg, y un último adaptador entre el último reflector de Bragg y el segundo conversor modal. El uso de dicha pluralidad de adaptadores permite utilizar reflectores de Bragg muy fuertes sin que las pérdidas por radiación en los interfaces con dichos resonadores Bragg reduzcan notablemente el factor de calidad (Q) intrínseco del circuito.

10

15

Cada adaptador de la pluralidad de adaptadores comprende secciones alternas con al menos dos índices efectivos diferentes, típicamente implementados mediante la misma técnica de grabación (completa o parcial) de la pluralidad de reflectores de Bragg. Es decir, el primero de los dos índices efectivos diferentes corresponde a segmentos de guía de onda con la misma anchura y altura que los segmentos de guía de onda de la pluralidad de reflectores de Bragg, mientras que el segundo de los dos índices efectivos diferentes corresponde a regiones que pueden bien estar grabadas hasta el sustrato, por lo que se elimina todo el material de núcleo de ese espacio; o bien pueden estar grabadas parcialmente, conservándose material de núcleo con una altura menor a la de la pluralidad de segmentos mencionada.

20

25

Dependiendo de sendas opciones preferentes, los adaptadores de la pluralidad de adaptadores pueden bien ser todos iguales (a excepción de por su simetría respecto a las cavidades Fabry-Perot), lo que facilita el diseño del dispositivo; bien tener una geometría adaptada a cada reflector de Bragg.

30

Alternativamente, en una tercera opción preferente, los segmentos que forman los adaptadores modales pueden estar implementados mediante estructuras sub-longitud de onda. En este caso, el uso de estructuras sub-longitud de onda permite ajustar el índice efectivo de los segmentos del adaptador lo que permite

35

un mayor grado de libertad de diseño y una reducción de los efectos de errores de fabricación.

5 Nótese que la estrategia particular de diseño de la pluralidad de adaptadores es independiente de la presente invención, pudiendo utilizarse cualquier técnica de diseño existente en el estado de la técnica. Por ejemplo puede utilizarse un optimizador automatizado, o bien utilizar estrategias conocidas en el estado de la técnica para
10 minimizar las pérdidas de radiación. Algunas de estas técnicas de minimización de pérdidas incluyen optimizar los parámetros del adaptador para realizar una transición suave del modo guiado al modo Bloch del resonador Bragg, aplicar mecanismos de reciclado de la pérdida de radiación, o aplicar modulaciones de gap, por ejemplo de tipo parabólico.

15 El filtro integrado descrito permite obtener de forma muy sencilla y adaptada a las plataformas fotónicas mas comunes reflectores de Bragg suficientemente fuertes para tener un gran rango espectral libre, siendo no obstante fáciles de adaptar con los adaptadores descritos para minimizar las pérdidas de radiación.

20 Por ejemplo, en caso de implementarse un filtro según lo descrito con grabado parcial y longitud de onda central en banda C, utilizando una profundidad de grabado de 70 nm, estándar en múltiples plataformas, se obtiene un rango espectral libre que cubre completamente dicha banda C, pudiendo obtenerse factores Q intrínsecos por encima
25 de 10^5 con tan sólo dos adaptadores. Además, los valores de acoplo necesarios para realizar un filtro de Butterworth de cinco secciones con un ancho de banda de 25 GHz pueden sintetizarse fácilmente cambiando el número de periodos de la red entre diez y cincuenta aproximadamente sin que se produzcan errores de discretización apreciables. Además, la geometría transversal es muy simple, imponiendo tamaños mínimos de
30 rasgo (MFS, del inglés 'minimum feature size') del orden de 100nm, lo que permite su fabricación estándar.

Comparado con las soluciones existentes en el estado de la técnica basadas en redes Bragg débiles (ratio entre el ancho de la banda prohibida y la longitud de onda central
35 típicamente por debajo de 0,1%), el filtro propuesto necesita un número mucho menor de periodos en cada reflector de Bragg, reduciéndose notablemente el tamaño total del

filtro. Adicionalmente, esta reducción de tamaño supone una reducción en la energía necesaria para implementar la sintonización térmica del dispositivo, así como una mayor eficiencia y una reducción de problemas asociados a la diafonía. Asimismo, la fuerza de los reflectores de Bragg del filtro propuesto proporciona una curva de respuesta en frecuencia con un rango espectral libre muchísimo mayor, lo que mejora la calidad del filtro pues evita la interferencia con canales de la misma banda.

Comparado con las soluciones existentes en el estado de la técnica basadas en redes Bragg intermedios o fuertes (es decir, con una mayor ratio entre el ancho de la banda prohibida y la longitud de onda central), el uso de una mayor anchura en la pluralidad de reflectores de Bragg facilita notablemente el diseño y optimización del filtro, al reducir el problema de computación fotónica a un cálculo bidimensional. Asimismo, evita la necesidad de recurrir a estructuras más complejas como cristales fotónicos con agujeros circulares o rectangulares, notablemente más difíciles de fabricar y diseñar, además de ser significativamente más sensibles a errores de fabricación.

Éstas y otras ventajas de la invención serán aparentes a la luz de la descripción detallada de la misma.

20 Descripción de las figuras

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, y para complementar esta descripción, se acompañan como parte integrante de la misma las siguientes figuras, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo:

La figura 1 muestra, en una vista superior, un filtro de acuerdo con una realización preferente de la invención, ilustrando esquemáticamente los principales elementos que lo componen.

La figura 2 presenta una vista en perspectiva de la misma realización preferente de la invención.

La figura 3 es una sección longitudinal esquemática que muestra un caso de grabación parcial, de acuerdo con una realización preferente del mismo.

La figura 4 ejemplifica el cálculo de la anchura mínima de las guías de onda que conforman las redes de Bragg del filtro de la invención, de acuerdo con una realización preferente del mismo.

5 La figura 5 presenta un primer ejemplo de prestaciones obtenibles con distintas realizaciones preferentes de la invención para un ancho de banda de 50 GHz y distinto número de resonadores.

10 La figura 6 presenta un segundo ejemplo de prestaciones obtenibles con distintas realizaciones preferentes de la invención para un ancho de banda de 25 GHz y distinto número de resonadores.

La figura 7 presenta un tercer ejemplo de las prestaciones obtenibles con una realización preferentes de la invención, mostradas en un mayor rango espectral.

15

Realización preferente de la invención

En este texto, el término "comprende" y sus derivaciones (como "comprendiendo", etc.) no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no deben
20 interpretarse como excluyentes de la posibilidad de que lo que se describe y define pueda incluir más elementos, etapas, etc.

Asimismo, en el contexto de la presente invención, el término "aproximadamente" así como los términos de su familia (como "aproximado", etc.) deben entenderse como
25 indicadores de valores muy cercanos a aquéllos que acompañan dichos términos. Es decir, desviaciones dentro de límites razonables respecto a un valor exacto deben ser aceptados, puesto que un experto en la materia entenderá que dichas desviaciones son inevitables debido a inexactitudes de medida, variabilidad de parámetros, etc. Lo mismo se aplica a los términos "en torno a", "cercano a" o "sustancialmente".

30

Nótese que las realizaciones preferentes del dispositivo objeto de la invención se implementa preferentemente en silicio sobre aislante (SOI) para así beneficiarse del alto
35 contraste de índice de SOI. Sin embargo, realizaciones particulares podrían implementarse en otras plataformas fotónicas diferentes. Es decir, todas las guías de onda del dispositivo se realizan preferentemente mediante un núcleo de silicio, depositado sobre una capa aislante como, por ejemplo, dióxido de silicio. El material de

la cobertura puede variar para diferentes realizaciones de la invención, siendo algunas de las posibilidades dióxido de silicio, polímeros o aire, sin que esta lista limite el uso de otras posibles opciones.

5 La figura 1 (vista en planta) y la figura 2 (vista en perspectiva) muestran de manera esquemática una realización preferente del filtro integrado basado en resonadores acoplados de la invención, para un caso de orden dos (es decir, dos resonadores acoplados), si bien debe entenderse como ejemplo ilustrativo de cualquier número de orden (N). En particular, las realizaciones preferentes de la invención se realizan con un
10 número de resonadores seleccionado entre tres y nueve. A más resonadores, es posible conseguir una mayor selectividad en frecuencia pero aumenta la complejidad del diseño, mientras que un número de resonadores pequeño reduce el tamaño total y disminuye la complejidad de diseño.

15 El número de resonadores está definido por el número de cavidades Fabry-Perot (6) o defectos del filtro, mientras que la longitud e índice efectivo de dichas cavidades Fabry-Perot (6) determinan su longitud de onda central de operación del resonador. En los casos prácticos más habituales, todos los resonadores deben tener una frecuencia de resonancia muy próxima entre sí, por lo que, para evitar desviaciones por errores de
20 fabricación, el filtro comprende preferentemente controladores térmicos que actúan sobre cada resonador. Dichos controladores pueden utilizarse además para implementar filtros sintonizables aplicando desplazamientos frecuenciales simultáneamente a todos los resonadores, más allá de las compensaciones de los errores de fabricación.

25

A cada lado de las cavidades Fabry-Perot (6), el filtro comprende dos reflectores de Bragg (5), estando la conexión entre cada cavidad Fabry-Perot (6) y cada reflector de Bragg (5) implementada mediante un adaptador (4). Nótese que, por claridad, el número
30 de segmentos representados para los reflectores de Bragg (5) es mucho menor al número requerido habitualmente por las redes de Bragg, siendo dicho número determinado mediante técnicas convencionales de diseño de filtros de resonadores acoplados, dadas la morfología y materiales particulares de cada realización. Asimismo, si bien se han representado todos los adaptadores (4) con dos segmentos de guía de
35 onda, se trata únicamente de un ejemplo ilustrativo, pudiendo dichos adaptadores (4) realizarse con un número distinto de segmentos, también siendo dicho número

determinado mediante técnicas convencionales de diseño de filtros de resonadores acoplados, dadas la morfología y materiales particulares de cada realización.

Nótese que si bien las cavidades Fabry-Perot (6), los reflectores Bragg (5) y los adaptadores (4) se han representado como segmentos homogéneos, también pueden implementarse mediante estructuras sub-longitud de onda (SWG, del inglés 'sub-wavelength'), es decir, disposiciones periódicas con un periodo menor que la longitud de onda de la luz propagada por ellas, de modo que se evitan las reflexiones Bragg, y la disposición periódica se comporta como un metamaterial homogéneo cuyo índice efectivo depende de la proporción de material de núcleo 11 y cobertura 12 en cada periodo. Esto permite un mayor grado de libertad a la hora de diseñar las cavidades Fabry-Perot (6), los reflectores Bragg (5) y los adaptadores (4) así como una reducción de los efectos de errores de fabricación en dichas cavidades Fabry-Perot (6), de los reflectores Bragg (5) y de los adaptadores (4).

Un primer reflector de Bragg (5), ubicado en un primer extremo del conjunto de reflectores de Bragg (5) está conectado a una guía de onda de entrada (1) monomodo, mientras que un segundo reflector de Bragg (5), ubicado en un segundo extremo opuesto del conjunto de reflectores de Bragg (5) está conectado a una guía de onda de salida (7) monomodo. Puesto que la guía de onda de entrada (1) y la guía de onda de salida (7) presentan una primera anchura (w_1) menor que una segunda anchura (w_2) de los reflectores de Bragg (5), el filtro comprende sendos conversores modales (2) cuyo ancho varía adiabáticamente entre la primera anchura (w_1) y la segunda anchura (w_2). De esta manera, a pesar de que la segunda anchura (w_2) corresponde a una guía multimodo, sólo el modo transversal eléctrico fundamental se excita en los reflectores de Bragg (5). Nótese que la geometría particular de los conversores modales (2) puede variar dependiendo de la realización particular, siempre que se mantenga la condición de transición adiabática, siendo su forma más simple un trapecio isósceles por cada conversor modal (2). Asimismo, entre los conversores modales (2) y los adaptadores (4), el filtro puede comprender segmentos ensanchados (3) homogéneos con la segunda anchura (w_2).

Nótese que los reflectores de Bragg (5), las cavidades Fabry-Perot (6) y los adaptadores (4) presentan la misma segunda anchura (w_2), simplificando el diseño del dispositivo. Asimismo, el alto confinamiento lateral asociado al elevado valor de dicha segunda anchura (w_2), permite optimizar el diseño mediante técnicas tradicionales considerando

una aproximación bidimensional del problema, lo que reduce los tiempos de computación y manteniendo la precisión de la respuesta frecuencial del filtro obtenido. Finalmente, los reflectores de Bragg (5), las cavidades Fabry-Perot (6) y los adaptadores (4) presentan una estructural lateral muy simple, esto es, en dirección perpendicular a la propagación de la luz y paralela al interfaz entre sustrato (10) y núcleo (11). Dicha estructura lateral presenta una altura constante (para una posición fija a lo largo de la dirección de propagación) y está formada por secciones de guía rectangulares sin agujeros, cavidades ni protuberancias. La combinación del alto confinamiento lateral y la simplicidad de la estructura lateral resulta en una escasa radiación en el plano del chip. La radiación que se produce en la transición entre guías homogéneas y guías periódicas es fundamentalmente radiación vertical (típicamente conocida como 'out of chip'), siendo posible minimizarla mediante el diseño de los adaptadores (4).

La figura 3 presenta un corte longitudinal esquemático (es decir, cortado en un plano paralelo a la propagación de la luz y perpendicular al interfaz entre sustrato 10 y núcleo 11) de una realización particular del filtro, para el caso en el que se utiliza grabado parcial. Es decir, a partir de una altura (H) de la capa de núcleo (11), se definen una pluralidad de secciones de menor índice efectivo mediante grabación de una profundidad (d) menor que dicha altura (H), por lo que dicha pluralidad de secciones de menor índice efectivo conserva parte del material del núcleo (11). En el caso de los reflectores de Bragg (5), la longitud de dichas secciones es constante, mientras que las longitudes de las secciones de los adaptadores ($l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$) son variables, determinándose durante una etapa de diseño para ajustar la respuesta frecuencial del filtro.

Nótese que si bien se ha mostrado un ejemplo con dos alturas de grabado (es decir, grabado completo en los laterales de las guías del filtro y grabado de profundidad dentro de dichas guías), realizaciones particulares del filtro pueden implementarse con un mayor número de profundidades de grabado. Asimismo, en el caso de emplear dos únicas alturas de grabado, el filtro descrito puede utilizarse con una profundidad (d) de 70 nm, estándar en numerosas plataformas de fabricación.

La figura 4 presenta de manera esquemática una variación del índice efectivo (n_{eff}) de las guías de onda de altura H de los reflectores de Bragg (5), en función de la segunda anchura (w_2) de dichos reflectores de Bragg (5). Puede observarse que a medida que aumenta dicha segunda anchura (w_2), se aumenta el confinamiento lateral y aumenta el

índice efectivo (n_{eff}) resultante, acercándose asintóticamente a un índice máximo (n_{max}) correspondiente al caso de confinamiento lateral máximo (anchura infinita). Para obtener las ventajas descritas para el filtro de la invención, la segunda anchura (w_2) es mayor a un umbral de anchura mínimo (w_{min}) para el cual el índice efectivo se diferencia del índice máximo menos de un primer umbral (α).

Por ejemplo, para el caso de filtros en banda C implementados en silicio sobre aislante, estas condiciones sobre la segunda anchura (w_2) de la pluralidad de reflectores de Bragg (5) se traducen típicamente en valores de dicha segunda anchura (w_2) mayores de 3,5 micras, si bien los límites particulares de dichos valores dependen de la longitud de onda central, la altura (H) de la capa de material de núcleo, el material de cobertura (12), etc. De la misma manera, para el caso de filtros en banda C implementados en nitruro de silicio, las condiciones sobre la segunda anchura (w_2) de la pluralidad de reflectores de Bragg (5) se traducen típicamente en valores de dicha segunda anchura (w_2) mayores de 6 micras, si bien los límites particulares de dichos valores dependen del resto de factores de diseño mencionados.

La figura 5 presenta la respuesta frecuencial, calculada mediante software de simulación fotónica, de tres realizaciones particulares de la invención con un mismo ancho de banda a 3dB de 50 GHz y una longitud de onda central de 1550 nm: una primera realización de orden dos (21), una segunda realización de orden tres (22) y una tercera realización de orden cinco (23). La ratio de rechazo de la primera realización de orden dos (21) es de -19 dB, la ratio de rechazo de la segunda realización de orden tres (22) es de -27 dB y la ratio de rechazo de la tercera realización de orden cinco (23) es de -43 dB.

De manera equivalente, la figura 6 presenta la respuesta frecuencial de tres realizaciones particulares de la invención con un mismo ancho de banda a 3dB de 25 GHz. La ratio de rechazo de la primera realización de orden dos (21) es de -19 dB, la ratio de rechazo de la segunda realización de orden tres (22) es de -27 dB y la ratio de rechazo de la tercera realización de orden cinco (23) es de -44 dB; prácticamente idénticos al caso de ancho de banda de 50 GHz.

Finalmente, la figura 7 muestra la respuesta de la tercera realización de orden cinco (23) para un ancho de banda de 50 GHz, observando en un rango mucho mayor (100 nm). Como se puede observar, el rango espectral libre del filtro cubre con creces toda la

banda C (1530 nm – 1570 nm).

5 Gracias a la estructura y geometría propuestas para el filtro de la invención, estas prestaciones son muy superiores a las alcanzables en el estado de la técnica, en términos de factor de calidad, ratio de rechazo y rango espectral libre. Además, dichas prestaciones se obtienen con un número reducido de resonadores acoplados, facilitando su diseño y reduciendo el tamaño total del dispositivo. Asimismo, evita el uso de cristales fotónicos y otras estructuras alternativas más sensibles a errores de fabricación y con imposiciones más estrictas de MFS.

10

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

15

REIVINDICACIONES

1. Filtro integrado basado en resonadores acoplados que comprende:
 - una guía de onda de entrada (1) y una guía de onda de salida (7) con una primera anchura (w_1);
 - una pluralidad de reflectores de Bragg (5) con una segunda anchura (w_2) constante a lo largo de cada reflector de la pluralidad de reflectores de Bragg (5); y
 - una pluralidad de cavidades Fabry-Perot (6) dispuesta alternamente entre la pluralidad de reflectores de Bragg (5);caracterizado por que comprende, además:
 - dos conversores modales (2) cuyo ancho varía entre la primera anchura (w_1) y la segunda anchura (w_2); y
 - una pluralidad de adaptadores (4) que conectan la pluralidad de reflectores de Bragg (5) con la pluralidad de cavidades Fabry-Perot (6) y con los dos conversores modales (2), comprendiendo dicha pluralidad de adaptadores (4) secciones alternas con al menos dos índices efectivos diferentes.
2. Filtro integrado de acuerdo con la reivindicación 1 caracterizado por que la segunda anchura (w_2) genera un índice efectivo que se diferencia menos de un primer umbral (α), menor de 1%, respecto al índice efectivo generado por una anchura infinita ($n_{\max}$).
3. Filtro integrado de acuerdo con la reivindicación 2 caracterizado por que el primer umbral (α) es menor de 0,25%.
4. Filtro integrado de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que la pluralidad de reflectores de Bragg (5) tienen una banda prohibida asociada que supone una proporción mayor de un segundo umbral (b) respecto a una longitud de onda central del filtro, siendo dicho segundo umbral (b) mayor de 1,5%.
5. Filtro integrado de acuerdo con la reivindicación 4 caracterizado por que el segundo umbral (b) es mayor de 2,5%

6. Filtro integrado de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que la pluralidad de reflectores de Bragg (5) comprenden una pluralidad de segmentos de guía de onda separados por secciones grabadas hasta un sustrato (10) del filtro.
7. Filtro integrado de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5 caracterizado por que la pluralidad de reflectores de Bragg (5) comprenden una pluralidad de segmentos de guía de onda separados por secciones parcialmente grabadas hasta una profundidad de grabado (d).
8. Filtro integrado de acuerdo con la reivindicación 7 caracterizado por que la pluralidad de reflectores de Bragg (5) están sintonizados mediante variaciones de la profundidad de grabado (d) de cada reflector de Bragg (5).
9. Filtro integrado de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7 caracterizado por que la pluralidad de reflectores de Bragg (5) están sintonizados mediante variaciones en un número de periodos de cada reflector de Bragg (5).
10. Filtro integrado de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7 caracterizado por que la pluralidad de reflectores de Bragg (5) están sintonizados mediante variaciones en un periodo (Λ) de cada reflector de Bragg (5).
11. Filtro integrado de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que la pluralidad de cavidades Fabry-Perot (6) comprenden estructuras periódicas con un periodo menor que la longitud de onda de una señal óptica propagada por dichas estructuras periódicas.
12. Filtro integrado de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que la pluralidad de reflectores de Bragg (5) comprenden estructuras periódicas con un periodo menor que la longitud de onda de una señal óptica propagada por dichas estructuras periódicas.
13. Filtro integrado de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que la pluralidad de adaptadores (4) comprenden estructuras periódicas con un periodo menor que la longitud de onda de una señal óptica propagada por dichas estructuras periódicas.

14. Filtro integrado de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores
caracterizado por que los conversores modales (2) comprenden estructuras
periódicas con un periodo menor que la longitud de onda de una señal óptica
5 propagada por dichas estructuras periódicas.
15. Filtro integrado de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores
caracterizado por que comprende además segmentos ensanchados (3) entre los
conversores modales (2) y los adaptadores (4), comprendiendo los segmentos
10 ensanchados (3) estructuras periódicas con un periodo menor que la longitud de
onda de una señal óptica propagada por dichas estructuras periódicas.

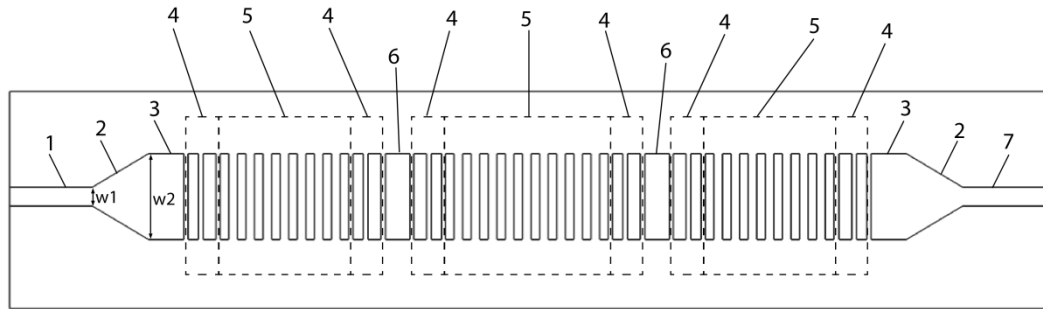


Fig. 1

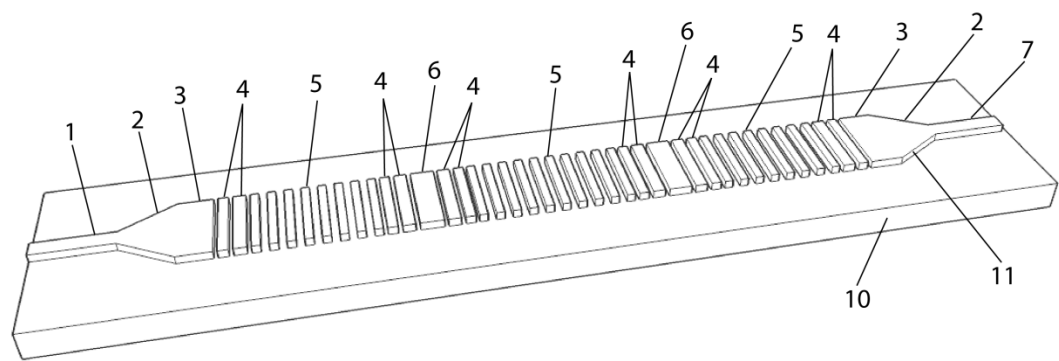


Fig. 2

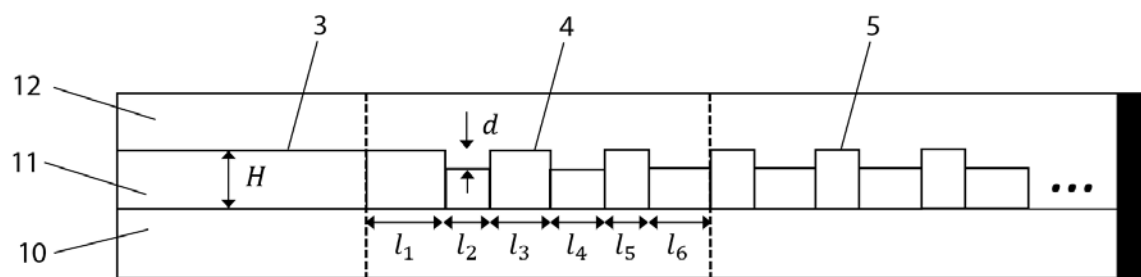


Fig. 3

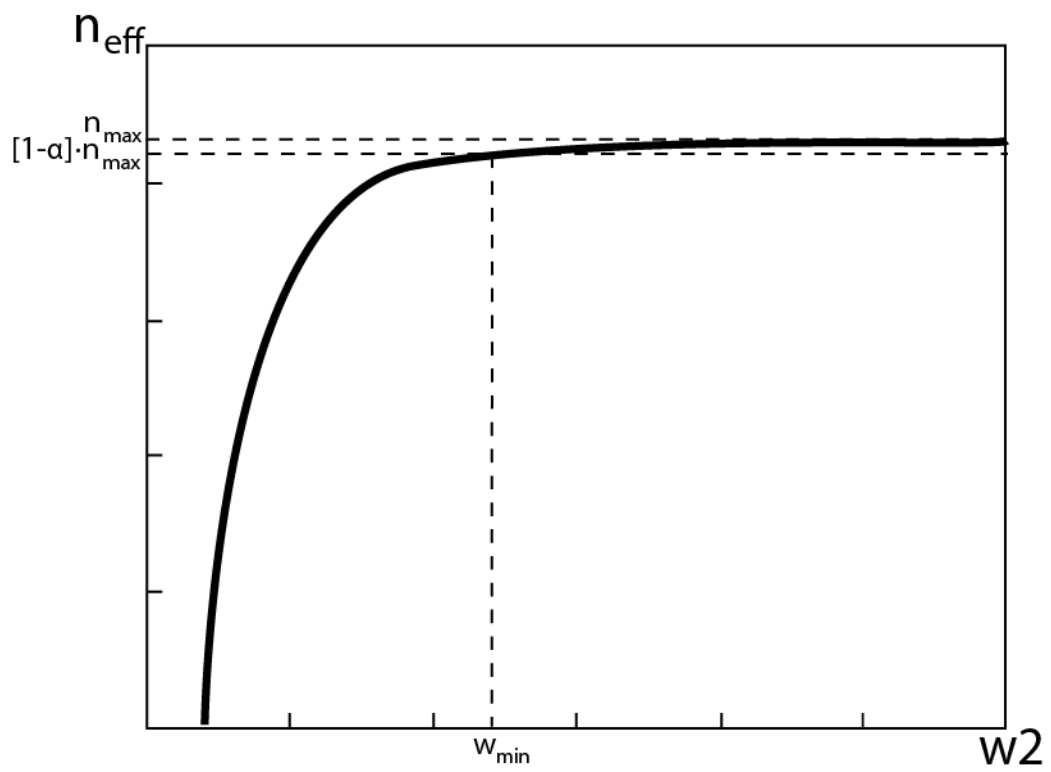


Fig. 4

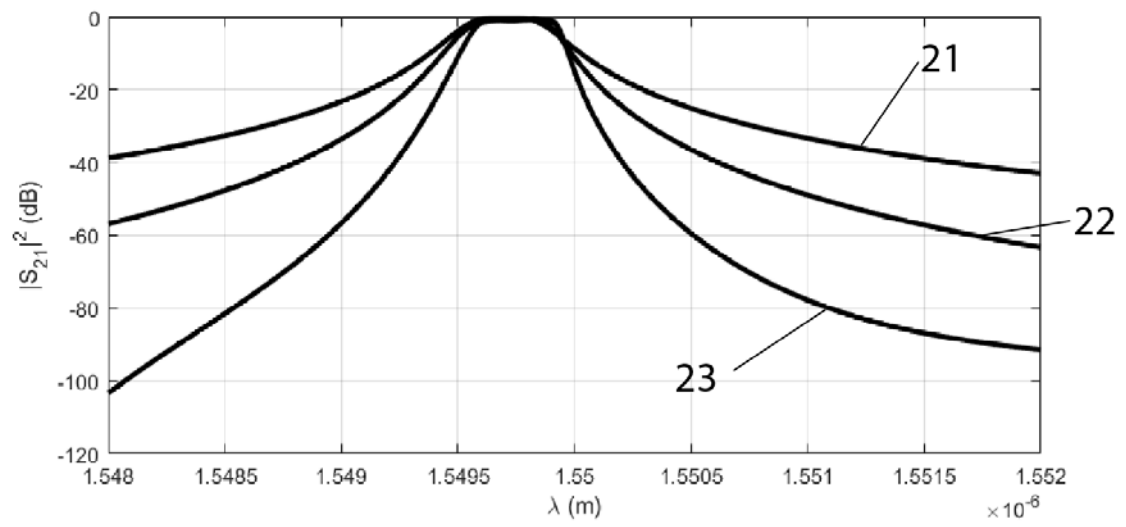


Fig. 5

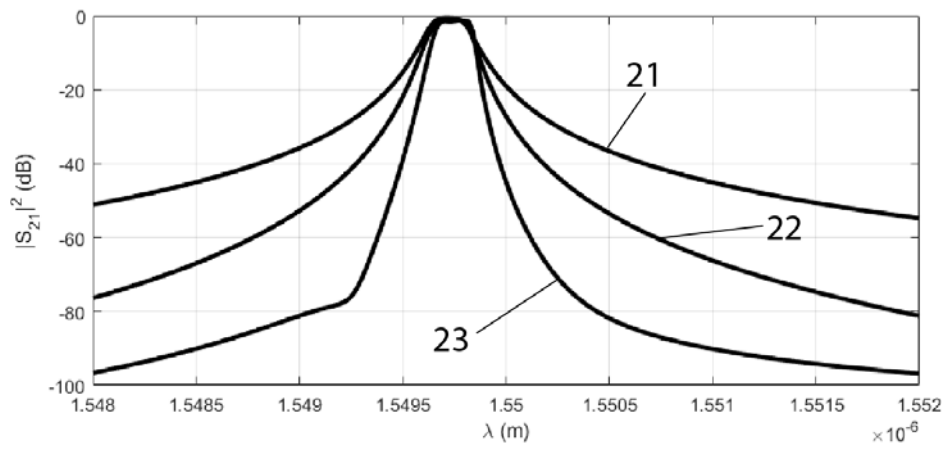


Fig. 6

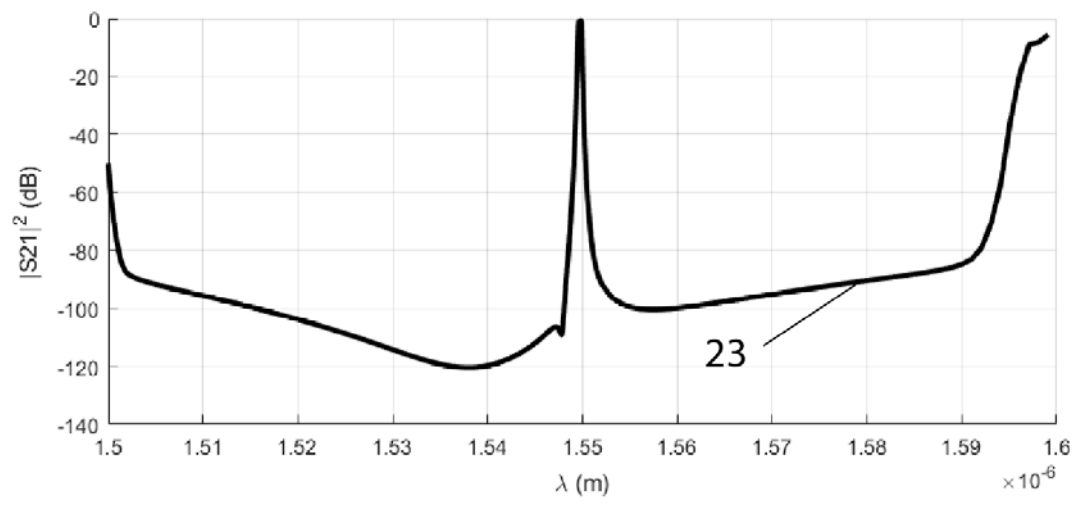


Fig. 7