

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 708 524**

21 Número de solicitud: 201731166

51 Int. Cl.:

G02B 6/12 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

29.09.2017

43 Fecha de publicación de la solicitud:

09.04.2019

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

03.07.2019

Fecha de concesión:

21.11.2019

45 Fecha de publicación de la concesión:

28.11.2019

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (50.0%)**

C/ Serrano, 117

28006 Madrid (Madrid) ES y

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA (50.0%)

72 Inventor/es:

GONZÁLEZ ANDRADE, David;

VILLAFRANCA VELASCO, Aitor;

CORREDERA GUILÉN, Pedro;

WANGÜEMERT PÉREZ, J. Gonzalo;

ORTEGA MOÑUX, Alejandro;

HALIR, Robert y

MOLINA FERNÁNDEZ, Iñigo

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

54 Título: **CONVERSOR Y MULTIPLEXOR DE MODOS INTEGRADO**

57 Resumen:

Conversor y multiplexor de modos integrado. Conversor y multiplexor (/demultiplexor) que combina un acoplador de interferencia multimodal (100), al menos un desfaseador (200) y una unión Y simétrica (300). Se realiza ingeniería sobre la dispersión del acoplador de interferencia multimodal (100) a través de estructuras sublongitud de onda para conseguir un muy gran ancho de banda. Se presentan varias topologías de desfaseadores (200) para un mayor aumento del ancho de banda, así como arquitecturas para multiplexar un mayor número de modos ópticos.

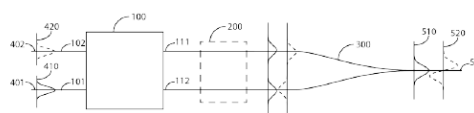


Fig. 1

ES 2 708 524 B2

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).

DESCRIPCIÓN**CONVERSOR Y MULTIPLEXOR DE MODOS INTEGRADO****5 SECTOR DE LA INVENCION**

La presente invención pertenece al campo de la fotónica integrada y más concretamente, al sector industrial dedicado a proporcionar conversores y multiplexores de modos basados en guías de onda.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Las interconexiones fotónicas de alta capacidad son muy demandadas ya que consiguen superar las limitaciones de capacidad de transmisión que imponen las interconexiones tradicionales de cobre. Algunas de las ventajas de las interconexiones fotónicas son el bajo consumo energético, la eliminación de las capacidades parásitas y la compatibilidad con un amplio abanico de técnicas de multiplexación que permiten incrementar el ancho de banda agregado. Por ejemplo, los esquemas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM, del inglés *wavelength division multiplexing*), multiplexación por división en polarización (PDM, del inglés *polarization division multiplexing*) y multiplexación por división espacial (SDM, del inglés *space division multiplexing*) se pueden combinar para escalar la capacidad de transmisión de datos de los dispositivos, en un intento de cubrir la creciente demanda de nuevos servicios que manejan grandes volúmenes de datos.

20

25

Todas estas técnicas se pueden combinar con la multiplexación por división en modos (MDM, del inglés *mode division multiplexing*) para incrementar aún más el ancho de banda agregado. La técnica MDM permite la transmisión y recepción de varios modos encriptados con diferente distribución espacial a través de una guía multimodo, en la que cada modo se explota como un canal de datos independiente. En un conversor y multiplexador (MUX) de modos MDM, cada una de las guías de entrada monomodo recibe un canal codificado en el mismo modo óptico de orden cero. El MUX convierte cada modo de orden cero de entrada en un modo óptico de diferente orden a la salida, uniéndolos todos en la misma guía multimodo de salida. Por ejemplo, un MDM MUX puede recibir tres señales diferentes compartiendo un modo TE₀ (esto es, un modo transversal eléctrico de orden cero) a través de tres guías de

30

entrada monomodo diferentes y convertirlas respectivamente en tres señales sobre los modos TE0, TE1 (transversal eléctrico de orden 1) y TE2 (transversal eléctrico de orden 2), respectivamente, compartiendo una misma guía multimodo de salida.

5 Nótese que un multiplexor MDM puede operar como demultiplexor (DEMUX) sin ningún cambio estructural, simplemente invirtiendo las entradas y salidas. Esto es, el mismo dispositivo puede funcionar como DEMUX usando la guía multimodo como entrada para una señal multiplexada en varios modos de distintos órdenes. Después, cada uno de esos modos se separa, se convierte en un modo de orden cero y se transmite de forma separada a la guía
10 monomodo de salida correspondiente. Por lo tanto, cuando se mencionen los multiplexores en este documento, se debe entender que abarca tanto los multiplexores como los demultiplexores.

Se han propuesto diferentes arquitecturas para implementar la conversión y
15 multiplexación de modos, incluyendo acopladores direccionales asimétricos (ADC), anillos resonadores (RR), acopladores adiabáticos de anchura variable y uniones en Y asimétricas. No obstante, los ADC y los RR son inherentemente dispositivos de banda estrecha, mientras que otras soluciones de acoplamiento de modos, requieren habitualmente de longitudes de propagación muy grandes, ya que se basan en el concepto de evolución modal. Dependiendo
20 de la implementación específica, las uniones en Y asimétricas también requieren de longitudes de propagación muy largas, o son muy sensibles a desviaciones de fabricación respecto al diseño ideal. Esto es, cualquier pequeña variación en el ancho de la guía fabricada, por otro lado inevitable en un proceso de fabricación en masa de las interconexiones fotónicas, provoca una degradación significativa de las prestaciones del dispositivo.

25 Alternativamente, se han propuesto también dispositivos MDM MUX basados en acopladores de interferencia multimodal (MMI), típicamente en combinación con desfasadores. Un MMI es un dispositivo fotónico con un número variable de entradas y salidas, que incluye una región multimodo (típicamente conocida por su nombre en inglés “slab”) en el que se generan autoimágenes de las señales de entrada a distancias de propagación específicas.
30 Diseñando apropiadamente las propiedades del slab y la distancia de propagación, a la que se colocan las salidas, es posible conseguir implementar la capacidad de dividir de potencia. Por ejemplo, en US 2014/126855 A1 se presenta un conversor de modos (sin capacidades de multiplexación), en el cada señal de entrada se divide por igual en varias entradas de un MMI

con múltiples entradas y una única salida. Combinando adecuadamente desfasadores individuales en cada entrada del MMI y una transición adiabática de anchura a la entrada, se pueden conseguir varias transformaciones entre diferentes modos. No obstante, las soluciones basadas en MMIs están limitadas por las pérdidas de exceso del MMI y el perfil de dispersión que en última instancia limitan la mejora de ancho de banda.

Por lo tanto, sigue existiendo la necesidad de dispositivos basados en guía de onda que integren la conversión y la multiplexación de modos y capaces de operar en un gran ancho de banda. También es deseable que los multiplexores tengan un tamaño reducido y una gran tolerancia a desviaciones de fabricación respecto al diseño nominal.

RESUMEN DE LA INVENCION

La invención propuesta resuelve los problemas mencionados mediante una arquitectura de conversión y multiplexación modal basada en el uso de un MMI que, gracias al uso de ingeniería sub-longitud de onda, proporciona un gran aumento en el ancho de banda. El convertor/multiplexor modal inventado comprende al menos dos guías de onda monomodo de entrada, que reciben señales de orden cero (por ejemplo, señales codificadas sobre los modos TE₀), y una guía de onda multimodal de salida que transmite al menos dos señales de salida codificadas sobre dos modos de diferente orden (por ejemplo, la primera señal codificada en el modo TE₀ y la segunda en el modo TE₁). La conversión y multiplexación modal de los dos modos de entrada sobre los modos de salida se realiza mediante la actuación coordinada de tres elementos: un acoplador de interferencia multimodal sublongitud de onda, al menos un desfasador y al menos una unión en Y simétrica.

El acoplador de interferencia multimodal comprende al menos dos entradas y dos salidas. Al menos la primera guía de onda de entrada del dispositivo MUX se conecta a la primera entrada del MMI, y la segunda guía de onda de entrada del MUX se conecta a la segunda entrada del MMI. Dependiendo de la implementación específica, las susodichas conexiones entre las guías de onda de entrada y las entradas del MMI pueden realizarse a través de elementos adicionales como, desfasadores, acopladores, etc, tal y como se verá posteriormente en la descripción detallada de las realizaciones preferentes. De la misma manera, todas las salidas del MMI se combinan en la guía de onda multimodo de salida a través de, al menos, un desfasador y una unión en Y. Nótese de nuevo que, la terminología

entrada/salida utilizada, ha sido únicamente para facilitar la comprensión del principio de funcionamiento, pero en ningún caso debe ser entendida como que limita el dispositivo para su uso como MUX, ya que el mismo dispositivo reportado puede ser usado como DEMUX con tan solo cambiar las entradas por salidas y viceversa.

5

El MMI se configura como un divisor de potencia balanceado, que equi-reparte la señal recibida por cualquiera de sus entradas entre todas las salidas. Esto típicamente se implementa mediante un acoplador MMI NxN, es decir, un MMI con el mismo número de entradas que de salidas, en el que cada entrada está alineada con una salida. Nótese que, en este proceso, se inducen ciertos desfases entre las salidas. En el caso de un MMI 2x2 (es decir, un MMI con dos entradas y dos salidas) el desfase introducido entre las dos salidas es de 90°.

10

Con objeto de incrementar el ancho de banda operativo, el MMI incluye al menos una región sub-longitud de onda (SWG), es decir, una región periódica que incluye secciones alternas de material del núcleo y de material de la cubierta, cuyo periodo es más pequeño que la longitud de onda más pequeña dentro del ancho de banda del convertidor/multiplexor de modos. Las estructuras sub-longitud de onda no generan efectos de difracción mientras que implementan un metamaterial cuyo índice de refracción efectivo está comprendido entre los índices del núcleo y la cubierta. El índice efectivo de este metamaterial puede cambiarse mediante una adecuada selección del ciclo de trabajo o factor de relleno (es decir, la proporción de cada material dentro de un periodo).

20

De forma preferente, la región SWG se diseña, mediante ingeniería de la dispersión, para maximizar el ancho de banda. Es decir, uno o más parámetros del SWG son elegidos, mediante simulación fotónica, para optimizar el ancho de banda y/o la planicidad de la respuesta en frecuencia. Los citados parámetros pueden incluir uno o más de los siguientes: periodo, factor de relleno, anchura de la guía y altura de la región multimodo.

25

También, de forma preferente, la región SWG comprende todo el MMI, y los mencionados parámetros de diseño del medio SWG permanecen constantes a lo largo de toda la región. Sin embargo, otras implementaciones particulares del MMI podrían incluir áreas con y sin SWG, áreas con diferentes parámetros SWG y/o áreas con parámetros SWG variables.

30

Con mayor preferencia, el MMI puede incluir adaptadores SWG en sus entradas y/o salidas. Cada adaptador de modos presenta una estructura SWG cuya anchura se modifica de forma progresiva entre la anchura de la guía de onda-cable monomodo de entrada convencional y una anchura mayor que sirve como entrada del dispositivo MMI. Más aún, el adaptador de modos SWG puede incluir un puente central de anchura variable, que comienza con la anchura de la guía de onda-cable monomodo y se reduce progresivamente hasta su desaparición en el interfaz de entrada con la región multimodo del MMI. Nótese que, el término “guía de onda-cable” (del inglés wire waveguide) se usa en este documento por contraposición al término “guía de onda SWG” en el sentido de que el núcleo es continuo y no incluye trozos periódicos del material de la cubierta.

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

Las salidas del MMI se conectan, al menos, a un desfasador, donde las señales de salida sufren un desfase adicional. Finalmente las salidas del desfasador se conectan con la guía multimodo de salida mediante una o más uniones en Y simétricas. Por ejemplo, en el caso de un multiplexor de dos modos (un MUX con dos entradas y una salida), el acoplador MMI basado en SWG es un MMI de 2x2. Las salidas del MMI se conectan a las guías de onda de entrada del MUX. Las salidas del MMI, entre las que se induce un primer desfase de 90° , se conectan a un desfasador donde se aplica un segundo desfase de 90° . Como resultado, cuando se introduce una señal por la primera guía de entrada, el primer y segundo desfase se cancelan entre si y las dos salidas del desfasador están en fase. Después de combinarse en la unión en Y, se obtiene un modo de orden cero. Por el contrario, cuando se introduce una señal por la segunda guía de entrada, el primer y segundo desfase se acumulan dando lugar a un desfase total de 180° lo que, después de combinarse en la unión en Y, produce un modo de primer orden.

En el caso de un MUX de tres modos se usará, de forma preferente, un MMI de 4x4. La primera guía de entrada será conectada a la primera entrada del MMI. La segunda guía de entrada se divide mediante una unión en Y, sufriendo un cierto desfase (preferentemente 90°) y alimenta la segunda y tercera entradas del MMI. La tercera guía de entrada se conecta a la cuarta entrada del MMI. Se aplica entonces un desfase de 45° entre la primera y segunda salidas del MMI y de 135° entre la tercera y cuarta salidas del MMI. Las cuatro salidas resultantes se combinan en la guía multimodo de salida, preferentemente mediante uniones en Y en cascada, aunque también podría usarse alternativamente una unión en Y de cuatro puertos.

10

Debe hacerse notar que para implementar las relaciones de fase deseadas es posible usar combinaciones alternativas de desfasadores y uniones en Y. Nótese también que esta arquitectura es escalable, por lo que usando un MMI con un mayor número de puertos y más desfasadores puede conseguirse un MUX con un mayor número de modos multiplexados. Finalmente, nótese también que la implementación de un MUX de más de dos modos es conseguido por las altas prestaciones del MMI y de los desfasadores en términos de: exceso de pérdidas, ancho de banda y tolerancias de fabricación; puesto que con la respuesta de los dispositivos convencionales, no habría suficiente margen en el cociente de extinción para combinar más de dos modos.

20

Se presentan, además, tres alternativas preferentes para la implementación del desfasador (o desfasadores) cuyas propiedades se combinan de forma sinérgica con el comportamiento del MMI para dotar a la invención de mejoras en el ancho de banda, disminución del tamaño, aumento del cociente de extinción y mayor tolerancia ante las desviaciones en la fabricación:

25

- Una primera topología para el desfasador que comprende de una primera guía de onda de anchura constante y una segunda guía de onda cuya anchura se incrementa progresivamente en una primera sección y luego se disminuye progresivamente otra vez a su tamaño original.
- Una segunda topología para el desfasador que comprende de al menos una región SWG cuyos parámetros SWG han sido diseñados, ayudándose de simulaciones fotónicas, para optimizar el ancho de banda y/o las tolerancias de fabricación. Con mayor preferencia, la segunda topología de este desfasador comprende dos

30

regiones SWG de diferente anchura, una en cada guía de onda, pudiéndose incluir adaptadores de modos SWG, similares a los usados en las entradas y salidas del MM.

- Una tercera topología de desfasador que comprende uno o más segmentos laterales de carga de fase ('phase loading' en inglés). En las realizaciones preferentes de este tercer tipo de desfasador pueden emplearse, anchuras modificadas, adaptadores modales, y/o estructuras SWG en la guía central o en los segmentos laterales

Finalmente, en otra realización preferente, el conversor/multiplexor de modos puede ser operado como conmutador mediante el uso de uno o más desfasadores controlables, que conmutados externamente entre, al menos, un primer estado de desfase y un segundo estado de desfase. Por ejemplo, para el caso de multiplexor de dos modos, se selecciona dinámicamente cuál de los dos modos de orden cero de entrada se transforma en el primer modo de la salida, mediante configuración del desfasador para inducir un desfase de 90° o de 270° .

El convertidor y multiplexor de modos propuesto proporciona un gran ancho de banda, bajas pérdidas y una elevada ratio de extinción en un dispositivo compacto. Estas y otras ventajas serán evidentes a la luz de la descripción detallada de la invención.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Para complementar la descripción que se está realizando y 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, se acompaña como parte integrante de dicha descripción un juego de figuras en donde, con carácter ilustrativo y no limitativo:

Figura 1 representa esquemáticamente los principales elementos de un multiplexor de dos modos de acuerdo con una realización preferida de la invención.

Figura 2 muestra en más detalle un acoplador de interferencia multimodal sublongitud de onda de acuerdo con una realización preferida de la invención.

Figura 3 ilustra los principales parámetros de una estructura sublongitud de onda.

Figura 4 presenta una primera realización preferente del desfasador de la invención, basada en una guía de onda continua de ancho variable localmente.

Figura 5 presenta una segunda realización preferente del desfasador de la invención, basada en una guía sublongitud de onda.

Figura 6 presenta una tercera realización preferente del desfasador de la invención, basada en la disposición de segmentos laterales de carga de fase a ambos lados de la guía central.

Figura 7 muestra en más detalle una unión en Y simétrica, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

Figura 8 representa esquemáticamente los principales elementos de un multiplexor de tres modos de acuerdo con una realización preferente de la invención.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

La figura 1 muestra una primera realización preferente del conversor y multiplexor de modos de la invención, para el caso particular de conversión de dos modos, esto es, para una realización particular del dispositivo que convierte dos modos de entrada de orden cero en un modo de salida de orden cero y un modo de salida de orden uno. El dispositivo comprende una primera guía monomodo de entrada (401) que recibe un primer modo de orden cero (410) y una segunda guía monomodo de entrada (402) que recibe un segundo modo de orden cero (420). La primera guía monomodo de entrada (401) y la segunda guía monomodo de entrada (402) están conectadas a la primera entrada (101) y la segunda entrada (102) de un MMI (100). El MMI (100) divide por igual ambas entradas en una primera salida (111) y una segunda salida (112), introduciendo un primer desfase de 90° entre dichas salidas. La primera salida (111) y la segunda salida (112) están conectadas a un primer desfasador (200) que induce un segundo desfase de 90° entre sus brazos superior e inferior. Ambos brazos se combinan después en una unión en Y simétrica (300), siendo la salida de la unión en Y simétrica (300) una guía de salida multimodo (501).

Cuando la luz entra a través de la primera guía de onda de entrada (401), el primer y el segundo desfase se cancelan entre sí. Por lo tanto, los modos ópticos que salen del primer desfasador (200) están en fase y su combinación resulta en un modo de orden cero de salida (510). Cuando la luz entra a través de la segunda guía de entrada (402), el primer y el segundo desfase se suman y dan lugar a un desfase total de 180° . Por lo tanto, los modos ópticos que salen del primer desfasador (200) están en contrafase y su combinación da lugar a un modo de orden 1 de salida (520)

La Figura 2 muestra el MMI (100) SWG en más detalle, el cual es un elemento común a todas las realizaciones de la invención. El MMI (100) comprende una región multimodo SWG (120), con secciones alternas de los materiales del núcleo y la cubierta. Las secciones rectangulares del material del núcleo se colocan transversalmente a las guías de entrada y salida. Para optimizar las condiciones de excitación del MMI (100), todas las entradas y salidas incluyen adaptadores modales (130) SWG, que incrementan progresivamente el ancho de la guía y reducen su índice efectivo. Los adaptadores modales (130) incluyen un puente central, esto es, un pequeño conector del material del núcleo en el centro de las secciones de cubierta. La anchura del puente central disminuye a medida que el ancho total de la guía aumenta, desapareciendo completamente en el interfaz con la región multimodo del MMI (100). Nótese que la geometría específica del adaptador modal (130) puede variar entre implementaciones siempre que se garantice una transición modal suave.

La Figura 3 muestra en más detalle los principales parámetros de cualquier estructura SWG, los cuales se pueden ajustar mediante simulaciones fotónicas para hacer ingeniería del índice de refracción y de la dispersión. Concretamente, dichos parámetros SWG incluyen la anchura de la guía de onda (W), la altura de la guía de onda (H), el periodo (Λ) y el ciclo de trabajo (f). El ciclo de trabajo, también conocido como factor de llenado (del inglés fill factor), es la relación entre las longitudes de la sección del núcleo(a) y de la cubierta (b) en un periodo (Λ).

La longitud de la región multimodo del MMI (100), $L_{CONV-MMI}$, viene dada por:

$$L_{CONV-MMI} = 3L_{\pi}/2$$

donde L_{π} es la longitud de batido entre el primer y el segundo modo, cuyos índices efectivos son respectivamente n_{eff}^0 y n_{eff}^1 :

$$L_{\pi} = \frac{\lambda}{2(n_{eff}^0(\lambda) - n_{eff}^1(\lambda))}$$

Los MMIs convencionales dependen directamente de la longitud de onda y, por tanto, las autoimágenes se forman a diferentes distancias para cada longitud de onda. Es esta limitación en el ancho de banda de los MMIs convencionales la que restringe las prestaciones de los dispositivos de multiplexación de modos convencionales. No obstante, mediante la técnica de ingeniería de la dispersión de los modos guiados de la sección multimodo del

acoplador MMI se puede conseguir una longitud de batido prácticamente plana, ya que la diferencia entre los índices efectivos de los modos $n_{eff}^0(\lambda) - n_{eff}^1(\lambda)$ permanece casi constante con la longitud de onda. Por ejemplo, el MUX propuesto proporciona una ratio de extinción mejor de -20dB en un ancho de banda de 300nm (1400 nm – 1700 nm), cubriendo las bandas C, S y L de comunicaciones ópticas.

El primer paso del diseño del MMI SWG (100) es definir una anchura del adaptador modal (130) en el interfaz con la región multimodo del MMI, W_a , que garantice que sólo se excitan los modos fundamentales. Esto se consigue simulando y analizando la curva de la parte real del índice efectivo en función de dicha anchura. Para garantizar que los modos están guiados, su parte real debe ser mayor que el índice de refracción de la cubierta y el substrato. No obstante, la anchura debe ser lo suficientemente pequeña como para que no se propaguen modos superiores. El valor de la anchura final se escoge de forma arbitraria entre ambos límites. La separación entre los adaptadores modales (130) en el interfaz con el slab, W_{sep} , se escoge para garantizar un acoplo inferior a uno predefinido como, por ejemplo -40dB. La anchura total del MMI (100), W_{MMI} , se calcula como $W_{MMI} = 2(W_{sep} + W_a)$. La longitud del adaptador modal (130) se escoge para asegurar una transición suave.

A continuación, se definen los parámetros del SWG. Un ciclo de trabajo del 50% es preferible para facilitar la fabricación. Esto es, las longitudes de la sección de núcleo (a) y de cubierta (b) son iguales. El periodo se escoge dentro de un rango con un límite inferior definido por la mínima dimensión fabricable de la tecnología de fabricación y un límite superior que evite la condición de Bragg. Este límite superior, Λ_{max} , se puede estimar como:

$$\Lambda_{max} = \frac{\lambda_{min}}{2n_{eq}}$$

donde λ_{min} es la longitud de onda inferior del rango de operación del MUX y n_{eq} se define por la fórmula de Rytov:

$$n_{eq} \approx \sqrt{f \cdot n_{eqcore}^2(\lambda) + (1-f) \cdot n_{cladding}^2(\lambda)}$$

donde f es el ciclo de trabajo, n_{eqcore} es el índice de refracción equivalente del núcleo, λ es la longitud de onda y $n_{cladding}$ es el índice de refracción de la cubierta. Después se simulan distintos periodos dentro del rango referido anteriormente, escogiendo el periodo que proporciona un mayor ancho de banda, y/o una respuesta más plana en el rango de longitudes de onda predefinido. Finalmente, la longitud del MMI (100) se optimiza mediante

nuevas simulaciones, partiendo del valor teórico inicial que viene dado por $L_{CONV-MMI} = 3L_{\pi}/2$.

La Figura 4 presenta una primera implementación del desfasador (200), compuesto por una primera guía de onda (201) y una segunda guía de onda (202). La segunda guía de onda (202) es una guía de onda-cable convencional con una primera anchura (w_1) sin ningún tipo de modificación geométrica, mientras que la primera guía comienza con la primera anchura (w_1), pero incluye dos regiones trapezoidales (201, 211) que ensanchan la guía hasta una segunda anchura (w_2) y luego la estrechan de nuevo hasta la primera anchura (w_1). Como consecuencia, la velocidad del modo se reduce y se consigue el desplazamiento de fase deseado. Nótese que implementaciones alternativas basadas en el mismo principio se pueden conseguir por ejemplo sustituyendo las regiones trapezoidales (210, 211) por otros perfiles como curvas; añadiendo una región central de ancho constante entre las regiones trapezoidales (201, 211); usando una segunda anchura (w_2) inferior a la primera anchura (w_1), y/o mediante cualquier otra combinación de variaciones de ancho que proporcionen el mismo desfase total.

Para diseñar la primera implementación del desfasador, la segunda anchura (w_2) se puede escoger arbitrariamente y optimizar posteriormente la longitud de las regiones trapezoidales (210, 211) hasta obtener el desfase deseado. No obstante, se debe tener en cuenta que la longitud mínima de las regiones trapezoidales combinadas (L_{psmin}) para asegurar transiciones adiabáticas es:

$$L_{psmin} = (w_2 - w_1) / \tan(\alpha_{min})$$

donde α_{min} es preferiblemente 5° . Nótese que es conveniente simular varias segundas anchuras (w_2), incluyendo en cada caso un rango de desviaciones de fabricación típicas respecto al diseño ideal, escogiendo aquella segunda anchura (w_2) que sea más robusta ante este efecto.

En la Figura 5 se presenta una segunda implementación del desfasador (200), que está también compuesto por una primera guía de onda (201) y una segunda guía de onda (202). La primera guía de onda (201) comprende un primer retardo SWG (221) con una tercera anchura (w_3), así como un primer adaptador de ancho (220) y un segundo adaptador de ancho (222) en cada extremo. La segunda guía incluye un segundo retardo SWG (231) con una cuarta

anchura (w_4), así como un tercer adaptador de ancho (230) y un cuarto adaptador de ancho (232) en cada extremos. La diferencia entre la tercera anchura (w_3) y la cuarta anchura (w_4) consigue el desfase deseado y al mismo tiempo una respuesta en frecuencia más plana que la primera implementación del desfasador (200). Además, optimizando los parámetros del SWG de esta segunda implementación del desfasador (200) mediante simulaciones fotónicas, y gracias también al gran ancho de banda del MMI (100), se consigue un dispositivo con un ancho de banda mayor. Para el ejemplo que se acaba de comentar, se puede conseguir una mejora de la ratio de extinción de -10dB en el rango de longitudes de onda de 300nm.

Nótese que se pueden implementar realizaciones alternativas del desfasador (200) basado en SWG, en las que la primera guía (201) y la segunda guía (202) tengan diferentes parámetros. Por ejemplo, en lugar de variar la anchura del SWG (W), se puede modificar el periodo (Λ) o el ciclo de trabajo (f). Se debe tener en cuenta también que la geometría específica de los adaptadores de ancho (220, 222, 230, 232) puede variar para diferentes implementaciones, siempre que se garantice una transición suave. Además, diferentes implementaciones del desfasador (200) pueden incluir regiones SWG en sólo una de las guías, aunque se recomienda incluir SWG en ambas para obtener una respuesta lo más plana posible.

La Figura 6 presenta una tercera implementación del desfasador de la invención, que se basa en incluir uno o más segmentos de carga de fase (250) laterales a ambos lados de la primera guía (201). Es conveniente que dicha primera guía presente una quinta anchura (w_5) reducida en la región en la que se encuentran localizados los segmentos de carga de fase (250) laterales para deslocalizar el campo e incrementar el efecto de dichos segmentos. Dicha reducción del ancho es preferiblemente realizada de forma progresiva mediante un adaptador modal. Además, los segmentos de carga de fase (250) pueden incluir características geométricas adicionales en sus extremos para conseguir una transición más suave, tales como extremos angulados o curvados.

Reducciones de ancho similares a las realizadas en la primera guía de onda (201) se pueden aplicar también a la segunda guía de onda (202), hasta conseguir la misma quinta anchura (w_5) reducida u otra diferente, con el objetivo de optimizar el ancho de banda. Además, esta segunda guía puede incluir también segmentos de carga de fase (250) siempre que presenten diferentes propiedades geométricas. Los segmentos laterales y/o las guías centrales pueden incluir también regiones SWG para realizar ingeniería de la dispersión. Esta

tercera implementación del desfasador (200) tiene la particular ventaja de que no le afectan las desviaciones de fabricación en un rango más amplio cuando sus parámetros geométricos se optimizan mediante simulación fotónica.

5 La Figura 7 muestra en más detalle una realización preferida de la unión en Y simétrica (300). La unión en Y simétrica (300) consta de dos entradas monomodo que alimentan dos brazos con forma sinusoidal. Los dos brazos finalmente se unen en una salida multimodo, típicamente del doble de ancho que las entradas, aunque el diseño de la geometría específica puede variar entre diferentes implementaciones. La unión en Y simétrica
10 (300) se diseña preferentemente optimizando su longitud mediante simulaciones fotónicas, manteniendo fija la separación entre los brazos, que viene dada por la separación entre las salidas del MMI (100) y/o el desfasador. La optimización de la longitud requiere llegar a un compromiso en el tamaño del dispositivo y las pérdidas de retorno.

15 Por último, la figura 8 muestra la arquitectura preferida para la multiplexación (o demultiplexación) de tres modos ópticos en el mismo dispositivo. Una tercera guía monomodo de entrada (403) que es excitada con un tercer modo de orden cero (430) es añadida en el plano de entrada. El MMI (100) consta de una tercera entrada (103), una cuarta entrada (104), una tercera salida (113) y una cuarta salida (114). La segunda entrada (102) y la tercera
20 entrada (103) del MMI son alimentadas, a través de una unión-Y simétrica (300) adicional, por la segunda guía monomodo de entrada (402), mientras que la cuarta entrada (104) y primera entrada (401) al MMI son, respectivamente, alimentadas por la tercera guía de onda monomodo de entrada (403) y la primera guía de onda monomodo de entrada (401). Para poder generar en guía de onda de salida multimodo (501) el primer modo de orden cero de
25 salida (510), el segundo modo de primer orden de salida (520) y el tercer modo de segundo orden de salida (530), el dispositivo incluye tres desfasadores (200):

- Un desfasador (200) de 90° entre la segunda entrada (102) y la tercera entrada (103) al MMI (100).
 - Un desfasador (200) de 45° (200) entre la primera salida (111) y segunda salida (112) del MMI (100).
 - Un desfasador (200) de 135° (200) entre la tercera salida (113) y cuarta salida (114) del MMI.
- 30

Nótese que la invención, de acuerdo con cualquiera de las realizaciones descritas, puede operar como un conmutador usando simplemente uno o más desfasadores (200) controlables en lugar de desfasadores (200) pasivos. Es decir, en lugar de usar desfasadores (200) que inducen un cambio de fase fijo, se emplean desfasadores cuya fase es controlada externamente, lo cual posibilita la conmutación simultánea de múltiples modos ópticos. El control del desfasador (200) puede ser implementado con cualquier tecnología conocida del estado del arte, como por ejemplo la inyección/depleción de portadores mediante una unión PN.

REIVINDICACIONES

1.- Conversor y multiplexor de modos integrados que comprende:

- 5 - al menos una primera guía de onda monomodo de entrada (401) adaptada para recibir una señal con un primer modo de orden cero (410) y una segunda guía de onda monomodo de entrada (402) adaptada para recibir una señal con un segundo modo de orden cero (420);
- 10 - una guía de onda de salida multimodo (501) adaptada para transmitir al menos un primer modo de orden cero de salida (510) y un segundo modo de primer orden de salida (520); y
- 15 - un acoplador de interferencia multimodal (100) configurado para repartir equitativamente señales ópticas desde una primera entrada (101) y una segunda entrada (102) en una primera salida (111) y una segunda salida (112), e inducir un primer desfase entre la primera salida (111) y la segunda salida (112);

caracterizado por que el conversor y multiplexor de modos además comprende:

- 20 - un primer desfasador (200) asociado a la primera salida (111) y la segunda salida (112), configurado para producir un segundo desfase adicional entre la primera salida (111) y la segunda salida (112), comprendiendo el primer desfasador una primera guía de onda (202) y una segunda guía de onda (201), variando la anchura de la segunda guía de onda (201) entre una primera anchura (w_1) y una segunda anchura (w_2),
- 25 - una unión en Y simétrica (300) situada a continuación del primer desfasador (200), configurada para combinar las señales provenientes del primer desfasador (200) en la guía de onda multimodo de salida (501), y
- 30 - una región en el acoplador de interferencia multimodal (100) que comprende una disposición de secciones periódicamente alternadas de un material de núcleo y de cubierta, con un período menor de un valor de la longitud de onda más corta en el ancho de banda del conversor y multiplexor de modos.

2.- Conversor y multiplexor de modos integrado, de acuerdo con la reivindicación 1,

caracterizado por que el acoplador de interferencia multimodal (100) además incluye una pluralidad de adaptadores modales (130) conectados a la primera entrada (101), segunda entrada (102), primera salida (111) y segunda salida (112), donde cada adaptador modal (130) comprende:

- 5 - una guía de onda que, al mismo tiempo que va progresivamente variando su ancho, va alternando de manera periódica secciones de los materiales empleados de núcleo y cubierta, y
- un puente central de material de núcleo que une las secciones definidas por el material del núcleo y donde la anchura de puente central es
- 10 inversamente proporcional a la de la guía de onda.

3.- Conversor y multiplexor de modos integrado, de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la primera guía de onda (202) del primer desfasador (200) presenta una anchura constante igual a la primera anchura

15 (w1).

4.- Conversor y multiplexor de modos integrado, de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que el primer desfasador (200) comprende secciones periódicamente alternadas del material de núcleo y de cubierta, cuyo

20 periodo de repetición es más pequeño que la menor longitud de onda del ancho de banda de operación del conversor y multiplexor de modos.

5.- Conversor y multiplexor de modos integrado, de acuerdo con la reivindicación 4, caracterizado por que el primer desfasador (200) comprende además una

25 pluralidad de adaptadores modales (220, 222, 230, 232) que varían progresivamente su anchura a la vez que también alternan de manera periódica secciones de los materiales de núcleo y cubierta.

6.- Conversor y multiplexor de modos integrado, de acuerdo con cualquiera de las

30 reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el primer desfasador (200)

comprende al menos un segmento de guía de onda de carga de fase (250) localizado lateralmente de la primera guía de onda (201).

5 7.- Conversor y multiplexor de modos integrado, de acuerdo con la reivindicación 6, caracterizado por que al menos un segmento de guía de onda de carga de fase (250) comprende una región que periódicamente alterna secciones de material del núcleo y material de la cubierta.

10 8.- Conversor y multiplexor de modos integrado, de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que:

- la primera guía de onda monomodo de entrada (401) se conecta a la primera entrada (101) del acoplador de interferencia multimodal (100),
- la segunda guía de onda monomodo de entrada (402) se conecta a la segunda entrada (102) del acoplador de interferencia multimodal (100), y
- 15 - el segundo desfase es de 90° .

20 9.- Conversor y multiplexor de modos integrado, de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una tercera guía de onda monomodo de entrada (403) adaptada para recibir un tercer modo de entrada de orden cero (430), y estando la guía de onda de salida multimodo (501) adaptada para además transmitir un tercer modo de segundo orden de salida (530), estando el convertidor y multiplexor de modos caracterizado por que el acoplador de interferencia multimodal (100) comprende además una tercera guía de onda de entrada (103), una cuarta guía de onda de entrada (104), una tercera salida (113) y

25 una cuarta salida (114), en donde el conversor y multiplexor de modos comprende además:

- una unión en Y simétrica (300) que conecta la segunda guía de onda de entrada monomodo (402) con la segunda entrada (102) y tercera entrada (103),
- 30 - un segundo desfasador (200) configurado para inducir un tercer desfase

entre la tercera salida (113) y la cuarta salida (114), y

- un tercer desfasador (200) configurado para inducir un cuarto desfase entre la segunda entrada (102) y la tercera entrada (103).

5 10.- Conversor y multiplexor de modos integrado, de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por que el segundo desfase es 45° , el tercer desfase es 135° y el cuarto desfase es 90° .

10 11.- Conversor y multiplexor de modos integrado, de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que al menos uno de los desfasadores (200) es un desfasador controlable (200) conmutado externamente entre un primer valor de desfase y un segundo valor de desfase.

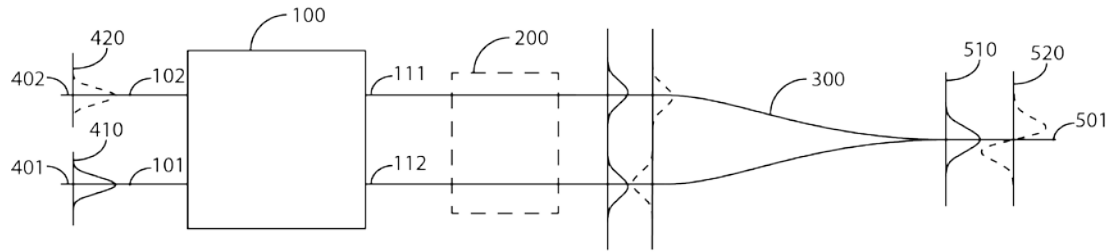


Fig. 1

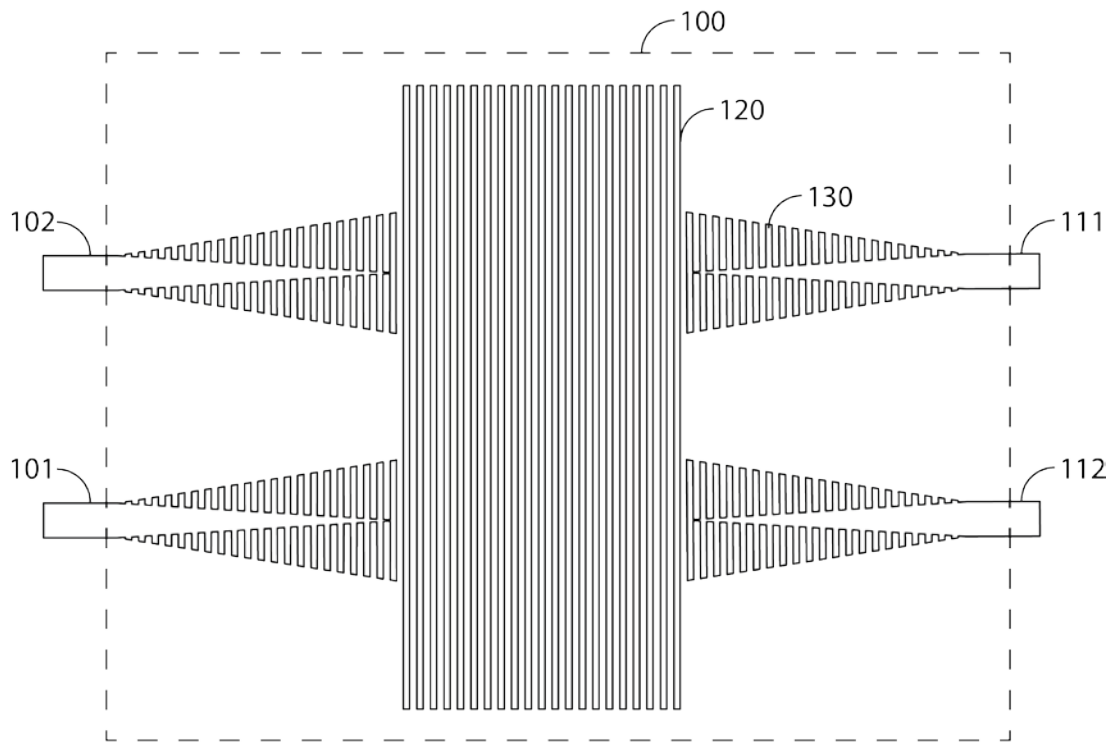


Fig. 2

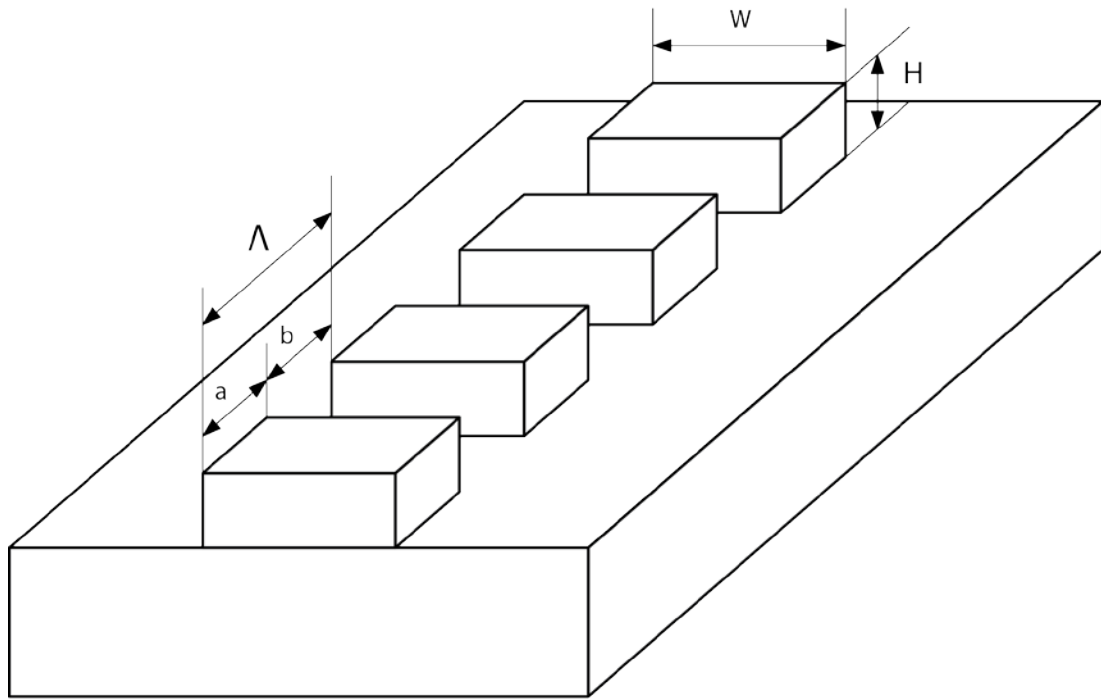


Fig. 3

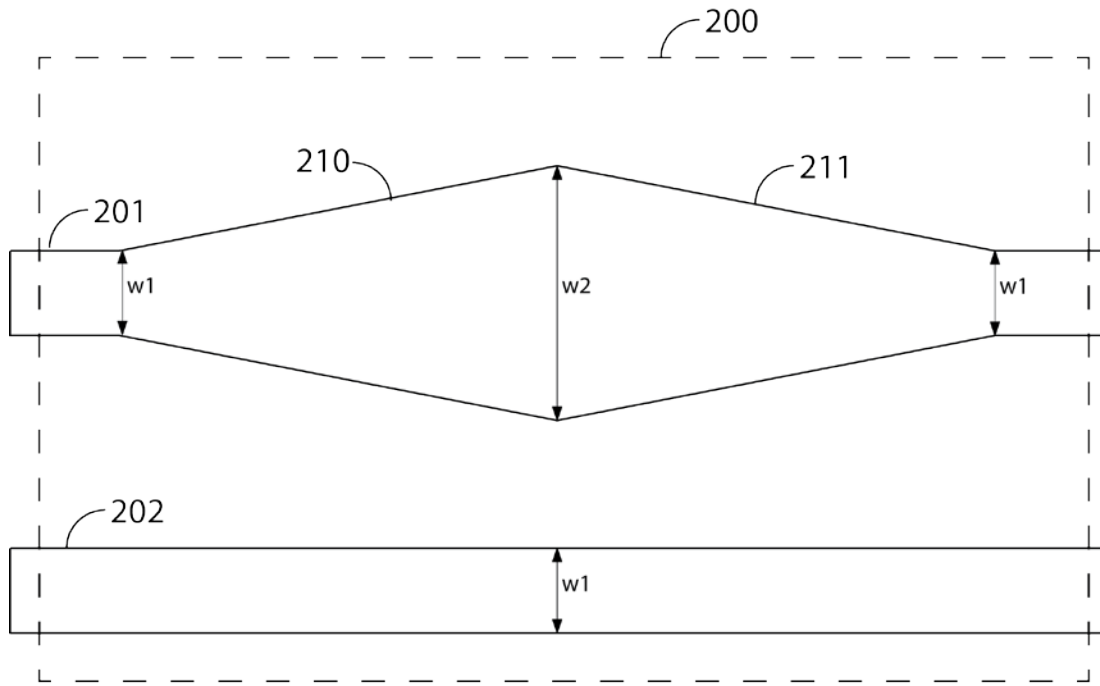


Fig. 4

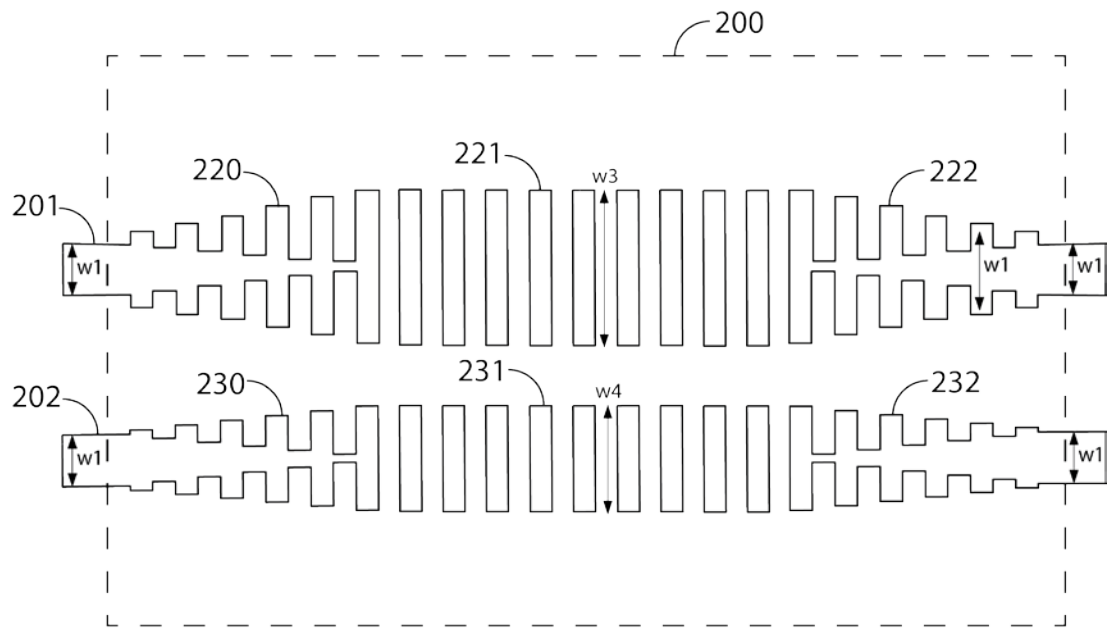


Fig. 5

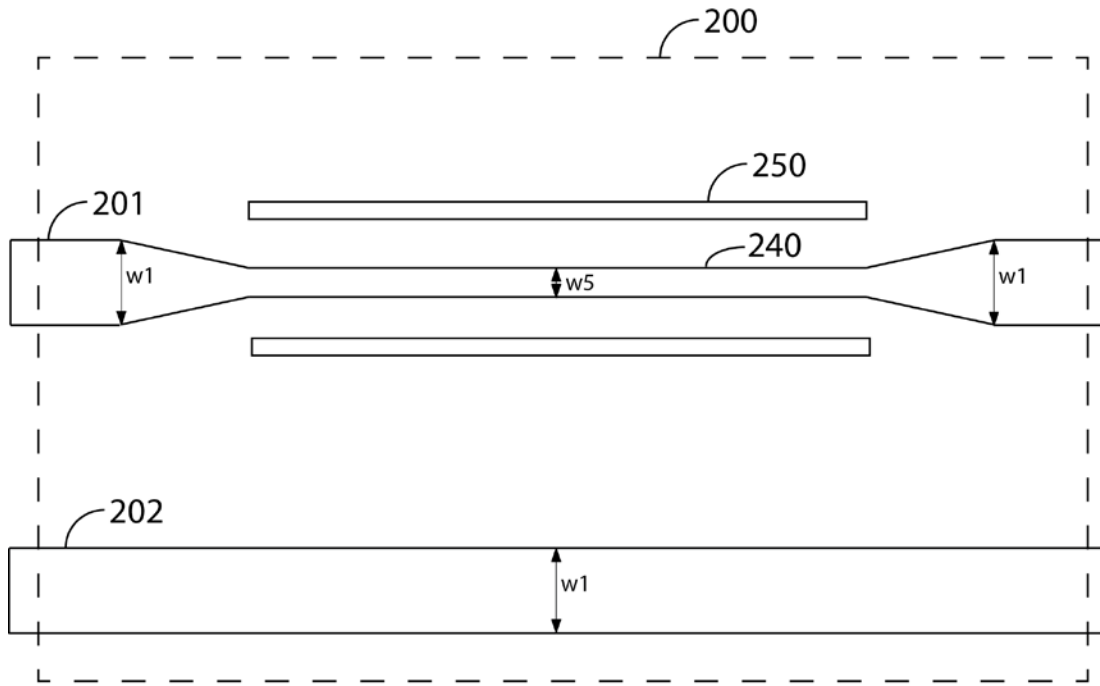


Fig. 6

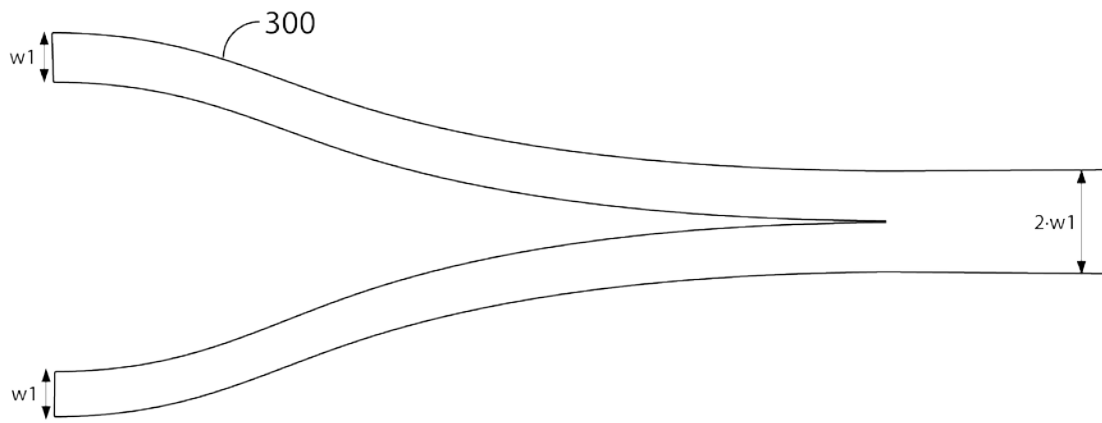


Fig. 7

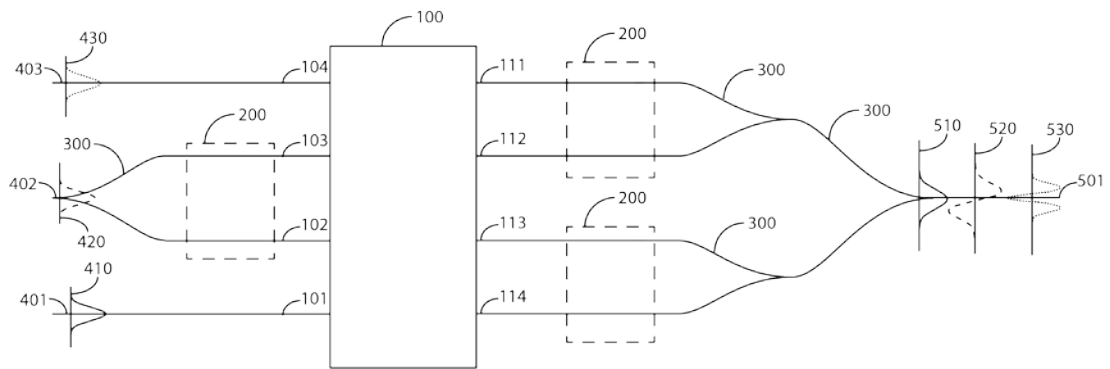


Fig. 8