

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 070 617**

51 Int. Cl.:

**G02B 6/126** (2006.01)

**G02B 6/28** (2006.01)

**G02B 5/18** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **24.01.2019 PCT/ES2019/070031**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.08.2019 WO19158790**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.01.2019 E 19710446 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.02.2026 EP 3754395**

54 Título: **Divisor de polarización integrado**

30 Prioridad:

**13.02.2018 ES 201830129**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**16.06.2026**

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (CSIC) (50,00%)**

**C/ Serrano 117**

**28006 Madrid, ES y**

**UNIVERSIDAD DE MALAGA (50,00%)**

72 Inventor/es:

**VILLAFRANCA VELASCO, AITOR;**

**HERRERO BERMELO, ALAINE;**

**CORREDERA, PEDRO;**

**HALIR, ROBERT;**

**ORTEGA MOÑUX, ALEJANDRO;**

**WANGÜEMERT PÉREZ, J. GONZALO y**

**MOLINA FERNÁNDEZ, IÑIGO**

74 Agente/Representante:

**CALLE LÓPEZ, Alejandro**

**ES 3 070 617 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Divisor de polarización integrado

5 **Objeto de la invención**

La presente invención se refiere al campo de óptica integrada, y más concretamente a un divisor de polarización.

10 **Antecedentes de la invención**

10 Uno de los principales problemas presentes en el mundo de la óptica integrada es la dependencia que presentan los dispositivos fotónicos con la polarización. Así pues, la mayoría de los dispositivos diseñados actualmente son exclusivos o bien para polarización transversal eléctrica (TE) o bien para polarización transversal magnética (TM). La integración de los divisores de polarización, tan utilizados en la óptica en el espacio libre, es pues de notable interés, dado que la potencia óptica transportada por la polarización ortogonal a la de diseño actuará como interferencia si no es extraída del circuito. Diversos fenómenos, materiales y estructuras ópticas han sido propuestos con el fin de implementar dichos divisores de polarización. Entre las alternativas propuestas caben destacar las redes de difracción sublongitud de onda, los cristales fotónicos, la refracción negativa presente en dichos cristales o la birrefringencia de forma (intrínseca de los materiales). No obstante, todas estas configuraciones presentan graves problemas a la hora de ser fabricadas, ya sea por una elevada sensibilidad a desviaciones respecto a los diseños nominales, inevitables durante el proceso de fabricación, bien por requerir geometrías o elementos auxiliares que no pueden ser implementados por los procedimientos habituales de fabricación de chips fotónicos comerciales.

25 Una posible solución a las limitaciones de fabricabilidad mencionadas es el uso de acopladores de interferencia multimodal (MMI, del inglés "multimode interference coupler"). Por ejemplo, la patente US5838842 divulga un MMI para división de polarización en dispositivos integrados. El MMI presenta una región de guía de onda multimodo (más conocida por su nombre en inglés, "slab") en la que se generan autoimágenes de los modos transversal eléctrico (TE) y transversal magnético (TM) a distintas longitudes. Dichas longitudes vienen determinadas por las diferencias en las constantes de propagaciones de ambos modos en la región de guía de onda multimodo. No obstante, puesto que la región de guía de onda multimodo es una guía de onda continua, las diferencias entre las constantes de propagación son pequeñas y poco controlables, resultando en dispositivos poco eficientes y que requieren elevadas distancias de propagación en la región de guía de onda multimodo, suponiendo por lo tanto un elevado tamaño total del dispositivo.

35 Nótese que los acopladores de interferencia multimodal (MMI) también han sido utilizados convencionalmente para la división de potencia, es decir, en lugar de separar dos polarizaciones en dos guías de onda de salida, separan parte de la potencia de una única polarización en dos o más guías de onda de salida. Las prestaciones de los MMI como divisores de potencia, y en particular sus pérdidas y su ancho de banda, han sido mejorados mediante el uso de estructuras sublongitud de onda (SWG, del inglés "Sub-Wavelength grating"), como se presenta en ES2379058. Nótese que las estructuras SWG de dicho divisor de potencia, además de ser perpendiculares a las guías de onda de entrada y salida, están diseñadas para operar en un amplio ancho de banda a una única polarización. Es decir, los parámetros geométricos de dicha estructura SWG están seleccionados de forma que se optimiza el ancho de banda del dispositivo a una polarización, siendo el dispositivo inoperativo a la polarización ortogonal. En particular, la birrefringencia de la región de guía de onda multimodo implica longitudes de batido distintas para las polarizaciones TE y TM, por lo que las posiciones del MMI en las que se verifica la división de potencia son distintas para cada polarización, impidiendo su extracción conjunta. Es decir, en este tipo de dispositivos, la birrefringencia y la anisotropía de la estructura SWG no son controlables durante diseño, sino que son consecuencia de sus parámetros geométricos.

50 Los acopladores de interferencia multimodal (MMI) también han sido utilizados como multiplexadores de longitud de onda, mediante la incorporación de un filtro óptico anisótropo, en el centro de dicho MMI, tal y como se presenta en US6445849. Nótese que, en este caso, además de que el dispositivo opera a una única polarización, siendo la otra polarización inutilizable, la estructura anisótropa del MMI es un elemento externo implementado con otro material distinto al del núcleo y al de la cobertura, y con una geometría que impide su disposición de acuerdo con los métodos de fabricación habituales de dichos núcleo y cobertura, lo que dificulta la fabricación e integración del dispositivo.

55 Otro documento relevante es US2016282555A1, que introduce un manipulador óptico que incluye una primera sección para propagar una señal óptica con múltiples modos de polarización, incluyendo un modo eléctrico transversal y un modo magnético transversal, y una segunda sección para propagar por separado el modo eléctrico transversal y el modo magnético transversal de la señal óptica. El manipulador óptico también incluye una sección de interferencia multimodo (MMI) con una ranura con un primer índice de refracción menor que un segundo índice de refracción de la sección MMI. La ranura se extiende a lo largo de toda la sección MMI para dividirla en dos canales conectados, incluyendo un primer canal y un segundo canal. La primera sección está conectada al primer canal y la segunda sección está conectada tanto al primer como al segundo canales.

65 En el documento WO2016123719A1 se describe un método para modificar una guía de onda óptica, en el que una guía de onda central preexistente y/o el volumen (evanescente) circundante se irradia con radiación externa en un haz de forma preferencial con suficiente intensidad para crear cambios permanentes en el índice de refracción de una

forma y patrón controlados de sección transversal a lo largo de la longitud axial de la guía de onda central preexistente. Esta remodelación de la guía de onda sirve de varias maneras, por ejemplo, para modificar el perfil de modos, la constante de propagación de cada modo permitido, la birrefringencia y las pérdidas de modos de radiación de los modos guiados preexistentes. Además, la remodelación puede permitir un cambio en el número de modos permitidos para propagarse en partes seleccionadas de una guía de onda óptica. De este modo, se puede introducir selectivamente una sección de guía de onda de Interferencia Multimodo (MMI) en la guía de onda preexistente.

También en el documento US2017248760A1 se describe un demultiplexor/multiplexor óptico, que comprende: una guía de onda de interferencia multimodo; al menos una primera guía de onda de acoplamiento que se encuentra con la guía de onda de interferencia multimodo en al menos una primera ubicación y una pluralidad de guías de onda de segundo acoplamiento que se encuentran con la guía de interferencia multimodo en una pluralidad de segundas ubicaciones que están espaciadas en una dirección de transmisión en relación con la al menos una primera ubicación, proporcionando la al menos una primera guía de onda de acoplamiento y la segunda guía de acoplamiento junto con la guía de onda de interferencia multimodo un primer interferómetro multimodo angulado que opera para demultiplexar una primera señal óptica con canales ópticos de una pluralidad de longitudes de onda o multiplexar señales ópticas de una pluralidad de longitudes de onda en una primera señal óptica con canales ópticos de la pluralidad de longitudes de onda.

Relacionado con el mismo campo técnico, el documento US7035494B1 describe un dispositivo de interferencia multimodo y un método para fabricarlo, y que comprende al menos un puerto de entrada, al menos un puerto de salida, una región de interferencia multimodo que separa el puerto de entrada del puerto de salida, y al menos una subregión en la región de interferencia multimodo, en la que una longitud de autoimagen dentro de las regiones de interferencia multimodo se reduce por un factor aproximadamente igual a uno más varias subregiones configuradas en la región de interferencia multimodo, en la que al menos una subregión está configurada para tener un ancho efectivo y un índice de refracción efectivos que recorren longitudinalmente la región de interferencia multimodo.

Por último, el documento US2013136389A1 introduce un de-MUX óptico que incluye una red sub-longitud de onda que magnifica una señal óptica de entrada. En particular, a lo largo de una dirección perpendicular a una dirección de propagación de la señal óptica, la red sub-longitud de onda tiene un índice efectivo de refracción espacialmente variable que es mayor en el centro de la red sub-longitud de onda que en un borde de la red sub-longitud de onda. Además, el de-MUX óptico incluye un dispositivo óptico que emite y difracta la señal óptica mediante una geometría refractiva, y que proporciona diferentes órdenes de difracción a los puertos de salida.

En definitiva, si bien los dispositivos MMI han sido utilizados con éxito para diversas funcionalidades, sus prestaciones como divisores de polarización, así como las prestaciones del resto de divisores de polarización integrados conocidos hasta la fecha presentan diversas desventajas, como son el elevado tamaño de dispositivo, baja eficiencia, altas pérdidas, el escaso ancho de banda o la complejidad de fabricación. Existe por lo tanto en el estado de la técnica la necesidad de un divisor de polarización integrado compacto, eficiente, con elevado ancho de banda y de fácil fabricación.

## Descripción de la invención

La presente invención se presenta en las reivindicaciones anexas. La presente invención soluciona los problemas anteriormente descritos mediante un divisor de polarización basado en un acoplador de interferencia multimodo con una región de guía multimodo anisótropa SWG, es decir, una región formada por una disposición alterna de secciones de un material de núcleo y secciones de un material de cobertura, con un periodo menor que la longitud de onda de una luz propagada por dicha región anisótropa, en la que dicha anisotropía se ajusta mediante giro de las secciones alternas. Nótese que la estructura SWG descrita no supone ningún incremento en la dificultad ni en el número de pasos del proceso de fabricación. Es decir, el divisor de polarización de la invención puede integrarse junto con cualquier otra combinación de dispositivos en un chip fotónico, y pudiendo ser fabricado durante el mismo paso de exposición que el resto de dichos dispositivos (al contrario que otros divisores de polarización que requieren múltiples profundidades de grabación, paredes inclinadas, materiales adicionales, etc).

El dispositivo, preferentemente implementado en silicio sobre aislante (SOI, del inglés "Silicon on insulator"), comprende una guía de onda de entrada que recibe un modo transversal eléctrico (TE) y un modo transversal magnético (TM), y dos guías de salida que transmiten por separado dichos modos. Controlando las propiedades anisótropas de las estructuras SWG a través de su ángulo de giro respecto al eje óptico, se consigue generar, en algunas realizaciones, una autoimagen Talbot inversa del modo transversal eléctrico (TE) a una primera distancia (LTE) correspondiente a aproximadamente tres veces una longitud de batido de dicho modo TE ( $L_{\pi TE}$ ); y una autoimagen Talbot inversa del modo transversal magnético (TM) a una segunda distancia (LTM), correspondiente a aproximadamente tres veces una longitud de batido de dicho modo TE ( $L_{\pi TM}$ ). Nótese que se entiendo por autoimagen Talbot directa aquella posición en la que los modos propagados por la región de interferencia multimodal (MMI) interfieren constructivamente en un máximo alineado con la guía de onda de entrada. Del mismo modo, en la autoimagen Talbot inversa, la interferencia multimodal resulta en un máximo desplazado transversalmente respecto a la guía de onda de entrada.

Los parámetros geométricos de la estructura SWG del MMI de la invención se seleccionan, como en el proceso de las reivindicaciones anexas 12-15, mediante optimización por simulación fotónica, imponiendo que la longitud de batido del modo TM ( $L_{\pi TM}$ ) sea un número entero de veces mayor que la longitud de batido del modo TE ( $L_{\pi TE}$ ) preferentemente, el doble. Con el fin de optimizar la focalización de las autoimágenes de los modos TE y TM en la primera guía de onda de salida (imagen directa) y la segunda guía de onda de salida (imagen inversa) respectivamente, la longitud total del acoplador de interferencia multimodo es preferentemente aproximadamente tres veces mayor que  $L_{\pi TM}$  y seis veces mayor que  $L_{\pi TE}$ . Nótese que el control sobre la anisotropía proporcionado por la rotación de las estructuras SWG aumenta el grado de libertad a la hora de seleccionar el factor de proporcionalidad entre las distancias de focalización de las autoimágenes de los modos TE y TM, resultando en un dispositivo más compacto y de menores pérdidas que aquellos MMI en los que no existe dicha rotación. Asimismo, nótese que si bien otros parámetros geométricos SWG como el periodo o el factor de llenado pueden afectar a la anisotropía resultante, dicho efecto es significativamente menor que el producido por la rotación, limitando por lo tanto las prestaciones obtenibles por el divisor. Además, nótese que, al contrario que dichos parámetros (periodo y factor de llenado) el ángulo de giro no afecta al tamaño mínimo de rasgo del dispositivo (del inglés "minimum feature size") y por lo tanto no afecta a su dificultad de fabricación.

La estructura SWG del acoplador de interferencia multimodo está rotada un ángulo ( $\alpha$ ) mayor de cero, para controlar el comportamiento anisótropo, pudiendo controlar independientemente las distancias de focalización de las autoimágenes Talbot, y reduciendo así la longitud del dispositivo (es decir, la dimensión del dispositivo en la dirección principal de propagación, también denominada eje óptico). Es decir, los interfaces entre la pluralidad de secciones del material de núcleo y la pluralidad de secciones del material de cobertura forman un ángulo ( $\alpha$ ) mayor de cero con un plano perpendicular al eje óptico del dispositivo, estando dicho eje óptico definido por la dirección común de la guía de onda de entrada, la primera guía de onda de salida y la segunda guía de onda de salida. Nótese que el ángulo exacto en el que se optimiza ( $\alpha$ ) la respuesta del dispositivo depende del resto de parámetros geométricos del MMI (anchura, altura, material de cobertura, periodo y factor de llenado), determinándose mediante las simulaciones fotónicas correspondientes.

Nótese también que en MMIs convencionales, el número entero que establece la proporcionalidad entre las longitudes de batido debe escogerse en un rango limitado por los parámetros físicos del dispositivo, típicamente igual o mayor de 5. El control de las propiedades anisótropas de la estructura SWG de la presente invención permite fijar dicho número entero a dos, y ajustar las longitudes de batido de los modos TE y TM mediante selección del ángulo ( $\alpha$ ) para que cumplan dicha relación de proporcionalidad, resultando en una notable reducción del tamaño total del dispositivo.

De acuerdo con sendas opciones preferentes, las secciones de material de núcleo pueden bien ser continuas, bien estar divididas en dos o más partes por un hueco (habitualmente conocido por su nombre en inglés "gap"), rellenado o completado por el material de cobertura. Asimismo, dependiendo de la implementación particular del MMI, las características geométricas de la región SWG pueden mantenerse constantes a lo largo de todo el dispositivo, o modificarse a lo largo del mismo, ya sea de forma gradual o escalonada. También de acuerdo con sendas opciones preferentes, la guía de onda de entrada, la primera guía de onda de salida y/o la segunda guía de onda de salida pueden bien estar dispuestas perpendicularmente al interfaz del MMI, bien presentar un ángulo no perpendicular con dicho interfaz.

Con el fin de optimizar las pérdidas de inserción en la transición entre guías monomodo y la región multimodo del MMI, el dispositivo comprende un primer adaptador modal conectado a la guía de onda de entrada, un segundo adaptador modal conectado a la primera guía de onda de salida y un tercer adaptador modal conectado a la segunda guía de onda de salida. Los adaptadores modales comprenden estructuras SWG de anchura variable, preferentemente con un puente central de anchura inversamente proporcional a la anchura del adaptador. Asimismo, las estructuras SWG de los adaptadores presentan preferentemente una rotación progresiva entre una dirección perpendicular a la guía de onda y el ángulo ( $\alpha$ ).

Si bien el ángulo ( $\alpha$ ) óptimo depende de los materiales utilizados y del resto de parámetros geométricos de la estructura SWG (por ejemplo de la altura, anchura, periodo y/o factor de llenado), para un ejemplo en silicio sobre aislante con una altura de 0.26 micras, un periodo de 0.22 micras y un factor de llenado de 0.5, el ángulo ( $\alpha$ ) se encuentra preferentemente comprendido en un intervalo entre  $5^\circ$  y  $25^\circ$ , y más preferentemente, entre  $10^\circ$  y  $20^\circ$ . No obstante, de manera general, el ángulo ( $\alpha$ ) se selecciona durante el diseño del dispositivo mediante simulación fotónica de modo que se minimizan la primera (LTE) y la segunda (LTM) distancia, siempre manteniendo la relación de proporcionalidad entre ambas.

El dispositivo descrito proporciona por lo tanto un divisor de polarización compacto, de bajas pérdidas y elevado ancho de banda, fabricable en un único paso de litografía. Es decir, la mejora de prestaciones no lleva asociada ningún aumento de la complejidad de fabricación. Éstas y otras ventajas de la invención serán aparentes a la luz de la descripción detallada de la misma.

### 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:

5 La figura 1 muestra un acoplador de interferencia multimodo con secciones rotadas, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

La figura 2 ilustra los principales parámetros geométricos de una estructura sublongitud de onda.

10 La figura 3 ejemplifica el funcionamiento de la propagación de haces ordinarios y extraordinarios en una estructura anisótropa.

La figura 4 ilustra el efecto del ángulo de giro sobre las propiedades anisótropas de una estructura SWG.

**Realización preferente de la invención**

15 Nótese que la invención está descrita con el dispositivo operando como divisor de polarización. No obstante, el mismo dispositivo puede operar de manera recíproca como multiplexor de polarización, es decir, combinando dos señales de polarizaciones ortogonales de dos guías de entrada en una única guía de salida, simplemente invirtiendo la dirección de operación del dispositivo.

20 También debe notarse que el divisor de polarización 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 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.

25 En cuanto a la fabricación de los dispositivos propuestos, nótese que las estructuras sublongitud de onda (SWG), independientemente de su ángulo de giro respecto al eje óptico, no incrementan la dificultad ni el número de pasos respecto a la fabricación de guías de onda convencionales. Es decir, todas las estructuras utilizadas por el divisor de polarización de la invención pueden fabricarse mediante un único paso de exposición a profundidad completa de cualquier técnica de grabación microelectrónica convencional, como por ejemplo, mediante exposición a haz de electrones ("e-beam" en inglés) o a ultravioleta profundo ("deep-UV" en inglés).

30 La figura 1 muestra una primera realización preferente de la invención, basada en un acoplador de interferencia multimodo (110), más concretamente un acoplador de interferencia multimodo (110) dotado de estructuras sublongitud de onda (SWG) cuya región de guía multimodo presenta características anisótropas generadas por una disposición periódica de secciones de un material de núcleo (210) y secciones de un material de cobertura (230), con un periodo ( $\Lambda$ ) menor que la longitud de onda de una luz propagada por dicha región anisótropa. El divisor de polarización de la invención comprende además una guía de onda de entrada (120) que recibe el modo transversal eléctrico (TE) y el modo transversal magnético (TM), una primera guía de onda de salida (130) destinada a transmitir el modo transversal eléctrico (TE) y una segunda guía de onda de salida (140) destinada a transmitir el modo transversal magnético (TM). La guía de entrada (120) se encuentra ubicada en un extremo de la región anisótropa del acoplador de interferencia multimodo (110) SWG, enfrentada a la primera guía de onda de salida (130), que se encuentra ubicada en el extremo opuesto del acoplador de interferencia multimodo (110) SWG, mientras que la segunda guía de onda de salida (140) también se encuentra ubicada en dicho extremo opuesto del acoplador de interferencia multimodo (110), separada lateralmente de la primera guía de onda de salida (130).

35 Con el fin de reducir las pérdidas por reflexión en los interfaces del acoplador de interferencia multimodo (110), el divisor de polarización comprende un primer adaptador modal (121) conectado a la guía de onda de entrada (120), un segundo adaptador modal (131) conectado a la primera guía de onda de salida (130) y un tercer adaptador modal (141) conectado a la segunda guía de onda de salida (140). El primer adaptador modal (121), el segundo adaptador modal (131) y el tercer adaptador modal (141) presentan estructuras SWG con el mismo periodo ( $\Lambda$ ) y ciclo de trabajo ( $f$ ) que el acoplador de interferencia multimodo (110), mientras que su anchura varía progresivamente desde la anchura de una guía de onda monomodo hasta una anchura final de adaptador modal, preferentemente mayor que la anchura de guía de onda monomodo por lo que, de manera preferente, las estructuras SWG presentan una anchura incremental. El primer adaptador modal (121), el segundo adaptador modal (131) y el tercer adaptador modal (141) comprenden asimismo un puente central, esto es, un pequeño conector de material del núcleo (210) en el centro de las secciones de material de cobertura (230). La anchura del puente central disminuye a medida que el ancho total del respectivo del adaptador modal (121, 131, 141) aumenta, desapareciendo completamente en el interfaz con la región multimodo del acoplador de interferencia multimodo (110). Nótese que la geometría específica del adaptador modal (130) puede variar entre implementaciones siempre que se garantice una transición modal suave, minimizando reflexiones en los interfaces entre el acoplador de interferencia multimodo (110), la guía de onda de entrada (120), la primera guía de onda de salida (130) y la segunda guía de onda de salida (140).

60 La figura 2 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 ( $\Lambda$ ) y el ciclo de trabajo ( $f$ ). El ciclo de trabajo (del inglés "duty cycle"), también conocido como factor de llenado (del inglés "fill factor"), es la relación entre una longitud ( $a$ ) de la sección de material de núcleo (210) y una longitud ( $b$ ) de la sección de material de cobertura (230), dentro de un periodo ( $\Lambda$ ). Tanto las secciones de material de núcleo (210) como las secciones de material de cobertura (230), se disponen sobre al menos una capa de material aislante (220).

La figura 3 ilustra esquemáticamente el comportamiento de cualquier material anisótropo (300), aplicable a la comprensión de la región de guía multimodo anisótropa del acoplador de interferencia multimodo (110) de la invención. Cuando un haz incidente (310) llega a un interfaz con el material anisótropo (300) con un ángulo de incidencia ( $\Phi_i$ ), una parte de la potencia óptica se refleja, generando un único haz reflejado (320) convencional, con un ángulo de reflexión ( $\Phi_r$ ). Sin embargo, la potencia transmitida al material anisótropo (300) no da lugar a un único haz, como ocurre en materiales isótropos convencionales, sino que genera dos haces con distinto ángulo: un haz ordinario (330) con polarización paralela al interfaz (es decir, polarización TE), y un primer ángulo de transmisión ( $\Phi_{TE}$ ); y un haz extraordinario (340) con polarización perpendicular al interfaz (es decir, polarización TM), y un segundo ángulo de transmisión ( $\Phi_{TM}$ ). La diferencia entre el primer ángulo de transmisión ( $\Phi_{TE}$ ) y el segundo ángulo de transmisión ( $\Phi_{TM}$ ), así como la diferencia de índice efectivo percibida por los dos modos, son utilizadas en la región de guía multimodo anisótropa del acoplador de interferencia multimodo (110) de la invención para seleccionar la relación de proporcionalidad entre las distancias a las que se generan las auto-imágenes Talbot de los modos.

Es decir, la región anisótropa SWG del acoplador de interferencia multimodo (110) genera una autoimagen Talbot del modo transversal eléctrico (TE) a una primera distancia ( $L_{TE}$ ), y una autoimagen Talbot del modo transversal magnético (TM) a una segunda distancia ( $L_{TM}$ ). Seleccionando mediante simulación fotónica los parámetros geométricos de la estructura SWG de dicho acoplador de interferencia multimodo (110), es decir, la altura de la guía de onda ( $H$ ), el periodo ( $\Lambda$ ) y el ciclo de trabajo ( $f$ ), se consigue que la segunda distancia ( $L_{TM}$ ) sea un número entero de veces mayor que la primera distancia ( $L_{TE}$ ). En esta realización preferente, la segunda distancia ( $L_{TM}$ ) puede ser aproximadamente dos veces mayor que la primera distancia ( $L_{TE}$ ). Imponiendo una longitud total del acoplador de interferencia multimodo (110) un número entero de veces mayor que la segunda distancia ( $L_{TM}$ ), se consigue focalizar el modo TE en la primera guía de onda de salida (130) y el modo TM en la segunda guía de onda de salida (140). Además, cuanto mayor sea el comportamiento anisótropo del material, más dispar será la relación entre la primera distancia ( $L_{TE}$ ) y la segunda distancia ( $L_{TM}$ ), y por lo tanto, más compacto será el acoplador de interferencia multimodo (110) resultante.

El comportamiento anisótropo del acoplador de interferencia multimodo (110) de la invención (es decir, la diferencia entre los índices de refracción efectivos para los modos TE y TM de orden 0 y orden 1), se puede controlar mediante rotación de la estructura SWG de la región anisótropa un ángulo ( $\alpha$ ). Es decir, unos interfaces entre la pluralidad de secciones del material de núcleo (210) y la pluralidad de secciones del material de cobertura (230), forman un ángulo ( $\alpha$ ) mayor de cero con un plano perpendicular al eje óptico del sistema, es decir, al eje definido por la dirección de la guía de onda de entrada (120), la primera guía de onda de salida (130) y la segunda guía de onda de salida (140) a su entrada al acoplador de interferencia multimodo (110). La selección de un ángulo ( $\alpha$ ) mayor que cero permite ajustar las longitudes de batido de los modos TE y TM para que sean proporcionales en un factor doble, optimizando así la longitud del acoplador de interferencia multimodo (110).

Nótese que, en realizaciones alternativas de la invención, la guía de onda de entrada (120), la primera guía de onda de salida (130) y la segunda guía de onda de salida (140) pueden presentar ángulos diferentes de  $90^\circ$  en su interfaz con el acoplador de interferencia multimodo (110). Es decir, en el dispositivo de la figura 4, el ángulo de incidencia ( $\Phi_i$ ) con el medio anisótropo es de  $0^\circ$ , correspondiente a una incidencia perpendicular. No obstante, en otras realizaciones, dicho ángulo de incidencia ( $\Phi_i$ ) puede aumentarse girando la guía de onda de entrada (120), modificando así el primer ángulo de transmisión ( $\Phi_{TE}$ ) y el segundo ángulo de transmisión ( $\Phi_{TM}$ ). Al modificar dichos ángulos, se modifican también la primera distancia ( $L_{TE}$ ) y la segunda distancia ( $L_{TM}$ ) a la que se generan las autoimágenes de Talbot, pudiendo reducir por lo tanto el tamaño del dispositivo resultante.

Asimismo, es posible implementar la región anisótropa SWG del acoplador de interferencia multimodo (110) incluyendo uno o más huecos (del inglés "gap"), en las secciones del material de núcleo (210), quedando dichos huecos rellenados por el material de cobertura (230). Por ejemplo, en una realización preferente, cada sección de secciones de material de núcleo (210) mostrada esquemáticamente en las figuras 1 y 4 puede dividirse en dos secciones, separadas por un hueco central rellenado por el material de cobertura (230). El número y disposición de dichos huecos puede variar entre implementaciones.

Independientemente de la geometría particular del acoplador de interferencia multimodo (110), cuando está rotada la estructura SWG de la región anisótropa un ángulo ( $\alpha$ ), es recomendable modificar el primer adaptador modal (121), el segundo adaptador modal (131) y el tercer adaptador modal (141), respecto al caso de la estructura SWG perpendicular mostrado en la figura 1, con el fin de optimizar las transiciones entre dicho acoplador de interferencia multimodo (110), la guía de onda de entrada (120), la primera guía de onda de salida (130) y la segunda guía de onda de salida (140). Para ello, dichos primer adaptador modal (121), segundo adaptador modal (131) y tercer adaptador modal (141), comprenden estructuras SWG rotadas progresivamente entre  $0^\circ$  en el extremo más alejado del acoplador

de interferencia multimodo (110), y el ángulo ( $\alpha$ ) en el extremo en contacto con dicho acoplador de interferencia multimodo (110).

5 El diseño del dispositivo se realiza preferentemente mediante un proceso de simulación fotónica en dos etapas. En una primera etapa, se obtiene una primera aproximación del diseño mediante simulación de la estructura SWG como un material homogéneo y anisótropo. El material anisótropo utilizado se define a través de un tensor dieléctrico, obtenido mediante aproximaciones de Rytov para los índices efectivos del rayo ordinario (330) y el rayo extraordinario (340). En particular, se selecciona preferentemente una zona multimodal de un ancho inicial aproximadamente tres veces superior al del adaptador modal y una altura de guía de onda (H) definida por la plataforma fotónica sobre la que se implementa el dispositivo. Fijando estos parámetros de partida, se realizan simulaciones fotónicas para un barrido de ángulos ( $\alpha$ ) de giro, modelando así la evolución de las propiedades anisótropas del MMI para el caso particular de aplicación del dispositivo. Esta primera aproximación permite realizar simulaciones en tres dimensiones reduciendo el tiempo y coste computacional de simulación. Si bien se recomienda el uso de alturas de guías de onda de 260 nm para favorecer el confinamiento del modo transversal magnético (TM), nótese que el dispositivo de la invención puede adaptarse a otras alturas de la guía de onda (H).

20 Una vez modeladas las propiedades anisótropas a distintos ángulos para la geometría y plataforma particulares bajo análisis, dicho modelado se aplica a una primera optimización mediante barrido de diversos parámetros como son la anchura de la zona multimodal, el ciclo de trabajo de la correspondiente estructura SWG real o la longitud del divisor de polarización. Dicho primer proceso de optimización se realiza ejecutando barridos de los parámetros mencionados e imponiendo como objetivos la minimización de pérdidas de inserción totales, así como la verificación de un factor de proporcionalidad lo más cercano posible a 2 entre las longitudes de batido de los modos transversal eléctrico (TE) y transversal magnético (TM). Como resultado de esta optimización, se obtiene una aproximación de los parámetros de diseño iniciales (ángulo, anchura de la zona multimodal, periodo, ciclo de trabajo y longitud de dispositivo).

25 A partir de los parámetros de diseño obtenidos en la primera etapa, se procede al modelado físico de la estructura SWG completa (sin aproximaciones a medio homogéneo) que nos proporciona el diseño final del divisor de polarización. Si bien este proceso puede realizarse manteniendo los grados de libertad de todos los parámetros de diseño, se recomienda simplificar este segundo proceso de optimización para reducir la carga computacional del mismo, fijando la anchura de la zona multimodal (por ejemplo en 4 micras), el ciclo de trabajo (por ejemplo 0,5 para simplificar la fabricación), y el periodo (siempre imponiendo que dicho periodo quede fuera del régimen de Bragg, determinado por la relación de proporcionalidad entre el periodo de la estructura SWG; y la longitud de onda efectiva de la luz propagada por dicha estructura).

35 A continuación, se optimiza la multiplicidad entre longitudes de batido mediante ajuste fino (es decir, mediante barridos de menor variabilidad que en la primera etapa) del ángulo de giro y el número de periodos (y en caso de no haberse fijado según la recomendación del paso anterior, del ciclo de trabajo, la anchura de la zona multimodal, y/o el periodo SWG). Como objetivo de esta optimización, se impone una minimización de la desviación de la longitud de batido del modo transversal magnético respecto al doble de la longitud de batido del modo transversal eléctrico. Este segundo proceso de optimización se realiza preferentemente utilizando métodos tridimensionales de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD, del inglés "Finite difference time domain method"), si bien otras técnicas de computación fotónica pueden ser igualmente aplicadas al mismo.

45 Si bien el efecto exacto del giro de la estructura SWG depende de las propiedades de los materiales que la componen, así como del resto de sus parámetros geométricos, la figura 4, ejemplifica este efecto para el caso de una estructura SWG de silicio sobre aislante con una altura de guía de onda de 260 nm, una anchura de 4 micras, un periodo de 220 nm y un factor de llenado de 0,5, para una longitud de onda de 1550 nm. La figura 4a muestra los índices de refracción efectivos ( $n_{\text{eff}}$ ) en función del ángulo ( $\alpha$ ) para un modo TE de orden 0 (TE0) y para un modo TE de orden 1 (TE1). La figura 4b muestra los índices de refracción efectivos ( $n_{\text{eff}}$ ) en función del ángulo ( $\alpha$ ) para un modo TM de orden 0 (TM0) y para un modo TM de orden 1 (TM1). Nótese que un aumento del ángulo de giro ( $\alpha$ ) reduce los índices efectivos ( $n_{\text{eff}}$ ) de los modos TE0 y TE1, y aumenta los índices efectivos ( $n_{\text{eff}}$ ) de los modos TM0 y TM1, siendo además el efecto sobre la polarización TE significativamente mayor que sobre la polarización TM.

**REIVINDICACIONES**

1. Un divisor de polarización integrado que comprende un acoplador de interferencia multimodo (110) que a su vez comprende:

- 5 - una guía de onda de entrada (120) destinada a hacer llegar al acoplador de interferencia multimodo (110) un modo transversal eléctrico (TE) y un modo transversal magnético (TM) de una señal óptica,
- una primera guía de onda de salida (130) destinada a transmitir el modo transversal eléctrico (TE) de la señal óptica,
- 10 - una segunda guía de onda de salida (140) destinada a transmitir el modo transversal magnético (TM) de la señal óptica,

donde el acoplador de interferencia multimodo (110) además comprende una región de guía multimodo anisótropa formada por una pluralidad de secciones de un material de núcleo (210) y una pluralidad de secciones de un material de cobertura (230), respectivamente dispuestas alternadamente de manera periódica con un periodo ( $\Lambda$ ) menor que la longitud de onda de la señal óptica propagada por dicha región de guía multimodo anisótropa; y donde interfaces entre la pluralidad de secciones del material de núcleo (210) y la pluralidad de secciones del material de cobertura (230) forman un ángulo ( $\alpha$ ) con un plano perpendicular a un eje óptico definido por una dirección común de la guía de onda de entrada (120), la primera guía de onda de salida (130) y la segunda guía de onda de salida (140); caracterizado por que el divisor además comprende:

- un primer adaptador modal (121) conectado a la guía de onda de entrada (120);
- un segundo adaptador modal (131) conectado a la primera guía de onda de salida (130); y
- 25 - un tercer adaptador modal (141) conectado a la segunda guía de onda de salida (140);

donde cada uno de: el primer adaptador modal (121), el segundo adaptador modal (131) y el tercer adaptador modal (141) respectivamente comprende:

- una guía de onda de anchura variable, y
- 30 - secciones del material de núcleo (210) y secciones del material de cobertura (230) dispuestas de manera alternada y periódica.

el ángulo ( $\alpha$ ) es mayor que cero.

35 2. El divisor de polarización de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el ángulo ( $\alpha$ ) está comprendido entre  $5^\circ$  y  $25^\circ$ .

40 3. El divisor de polarización de acuerdo con la reivindicación 2, caracterizado por que el ángulo ( $\alpha$ ) está comprendido entre  $10^\circ$  y  $20^\circ$ .

45 4. El divisor de polarización de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que pluralidad de secciones del material de núcleo (210) comprenden un hueco central completado con material de cobertura (230).

50 5. El divisor de polarización de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el primer adaptador modal (121), el segundo adaptador modal (131) y el tercer adaptador modal (141) respectivamente comprenden un puente central de material de núcleo (210) que une las secciones del material del núcleo (210), siendo la anchura de cada puente central inversamente proporcional a la anchura del respectivo adaptador modal (121, 131, 141).

55 6. El divisor de polarización de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la región anisótropa del acoplador de interferencia multimodo (110) tiene propiedades geométricas constantes a lo largo de su longitud.

60 7. El divisor de polarización de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que la región anisótropa del acoplador de interferencia multimodo (110) comprende una geometría variable a lo largo de su longitud.

65 8. El divisor de polarización de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que al menos una guía de onda seleccionada de entre: la guía de onda de entrada (120), la primera guía de onda de salida (130) y la segunda guía de onda de salida (140) está dispuesta con un ángulo distinto de  $90^\circ$  en un interfaz con el acoplador de interferencia multimodo (110).

9. El divisor de polarización de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el material de núcleo (210) es silicio.

10. El divisor de polarización de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por que el material de núcleo (210) se encuentra dispuesto sobre una capa aislante.
- 5 11. Un proceso para usar un divisor de polarización integrado, donde el divisor de polarización integrado es según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, comprendiendo el proceso:
- recibir, en la guía de onda de entrada (120), la señal óptica tanto con el modo transversal eléctrico (TE) como el modo transversal magnético (TM);
- 10 proporcionar, a través de la primera guía de onda de salida (130) el modo transversal eléctrico (TE) de la señal óptica; y
- proporcionar, a través de la segunda guía de onda de salida (140) el modo transversal magnético (TM) de la señal óptica;
- 15 caracterizado por:
- propagar la señal óptica a través de la región de guía multimodo anisótropa para generar una autoimagen Talbot del modo transversal eléctrico (TE) a una primera distancia ( $L_{TE}$ ), y una autoimagen Talbot del modo transversal magnético (TM) a una segunda distancia ( $L_{TM}$ ), siendo dicha segunda distancia ( $L_{TM}$ ) un número entero de veces mayor que la primera distancia ( $L_{TE}$ ).
- 20 12. Un proceso para fabricar un divisor de polarización integrado, donde el divisor de polarización integrado es según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, comprendiendo el proceso:
- 25 proporcionar el acoplador de interferencia multimodo con la guía de onda de entrada (120), la primera guía de onda de salida (130) y la segunda guía de onda de salida (140);
- 30 formar la región de guía multimodo anisótropa de tal manera que la pluralidad de secciones de material de núcleo (210) y la pluralidad de secciones de material de cobertura (230) están respectivamente dispuestas alternadamente en una manera periódica tal que un periodo ( $\Lambda$ ) de las mismas es menor que una longitud de onda de la señal óptica a propagar a través de la región de guía multimodo anisótropa;
- 35 caracterizado por:
- calcular, por medio de simulación fotónica, una longitud de batido ( $L_{\pi TE}$ ) de un modo transversal eléctrico (TE) y una longitud de batido ( $L_{\pi TM}$ ) de un modo transversal magnético (TM) en base a la señal óptica a hacerse llegar al acoplador de interferencia multimodo y parámetros geométricos del acoplador de interferencia multimodo proporcionado;
- 40 calcular, por medio de simulación fotónica, el ángulo ( $\alpha$ ) mayor que cero que genera una autoimagen Talbot del modo transversal eléctrico (TE) a una primera distancia ( $L_{TE}$ ), y una autoimagen Talbot del modo transversal magnético (TM) a una segunda distancia ( $L_{TM}$ ) de tal manera que la segunda distancia ( $L_{TM}$ ) es un número entero de veces mayor que la primera distancia ( $L_{TE}$ ); y
- 45 ajustar la región de guía multimodo anisótropa de tal manera que interfaces entre la pluralidad de secciones de material de núcleo (210) y la pluralidad de secciones de material de cobertura (230) forman el ángulo ( $\alpha$ ) calculado con el plano perpendicular al eje óptico.
- 50 13. El proceso de la reivindicación 12, caracterizado por que la segunda distancia ( $L_{TM}$ ) es aproximadamente dos veces mayor que la primera distancia ( $L_{TE}$ ).
14. El proceso de una cualquiera de las reivindicaciones 12 y 13, caracterizado por que la región anisótropa del acoplador de interferencia multimodo (110) tiene una longitud que es aproximadamente tres veces mayor que la segunda distancia ( $L_{TM}$ ).
- 55 15. El proceso de una cualquiera de las reivindicaciones 12 a 14, donde el divisor de polarización integrado es parte de un chip fotónico integrado junto con uno o más otros dispositivos fotónicos, donde el divisor de polarización está fabricado durante una misma etapa de proceso de grabado con la que el u no o más otros dispositivos fotónicos son fabricados.
- 60

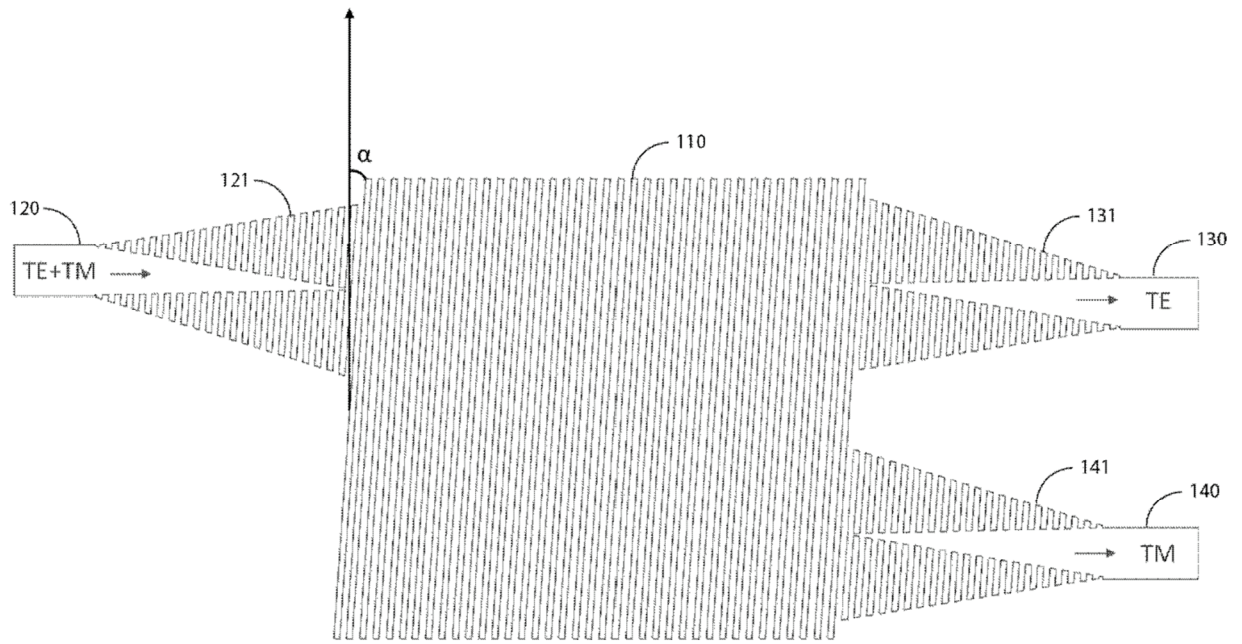


Fig. 1

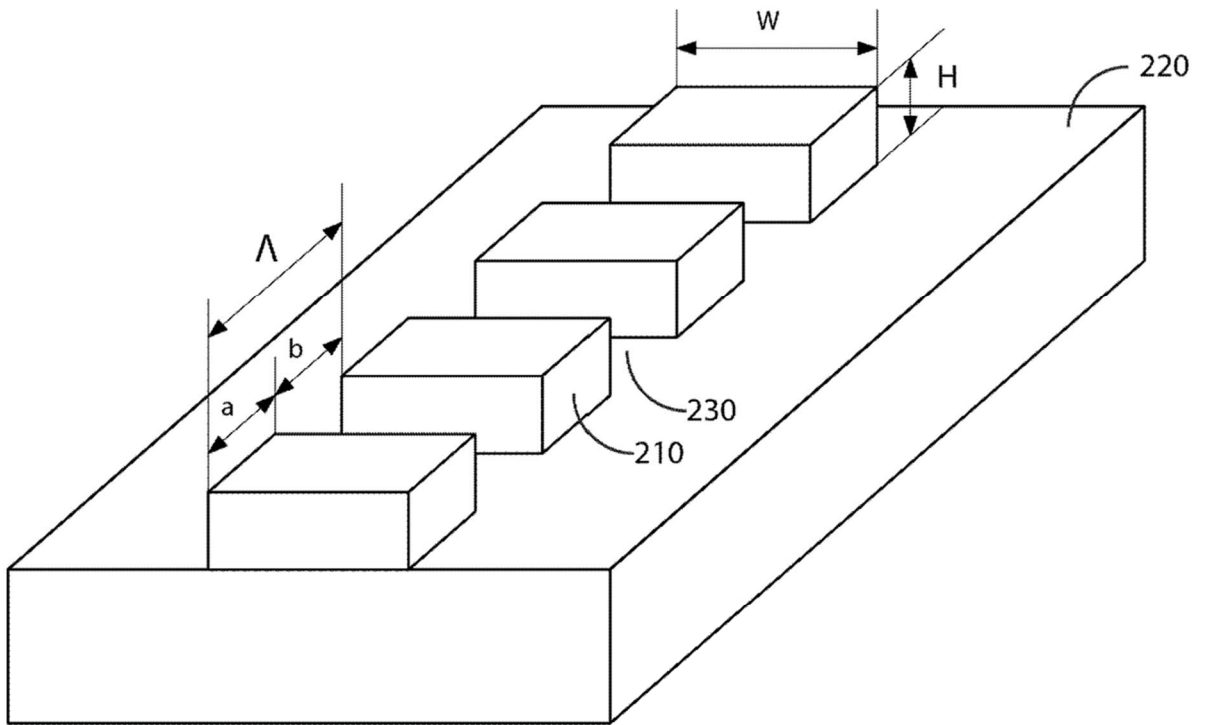


Fig. 2

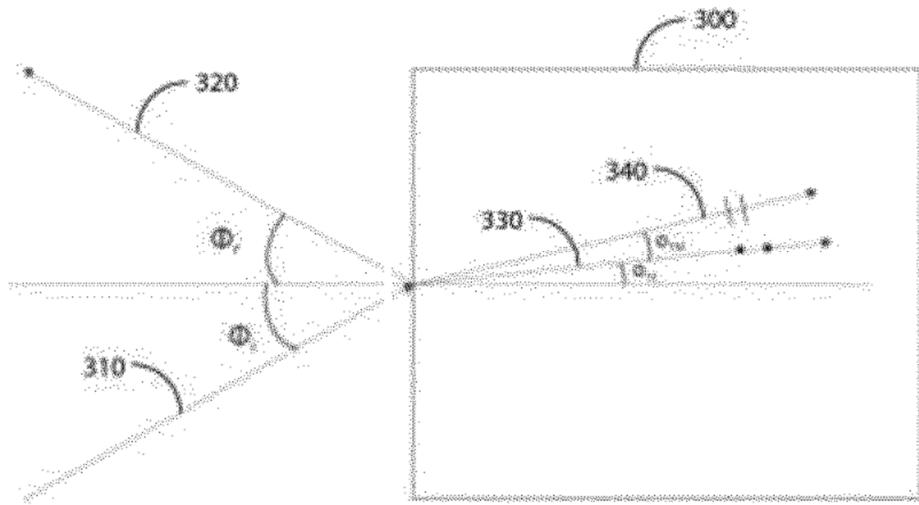


Fig. 3

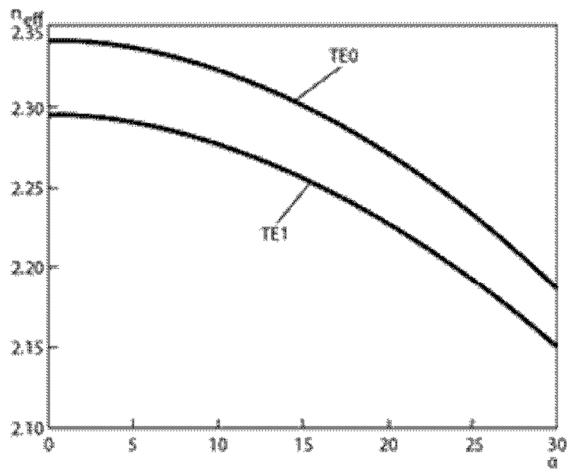


Fig. 4a

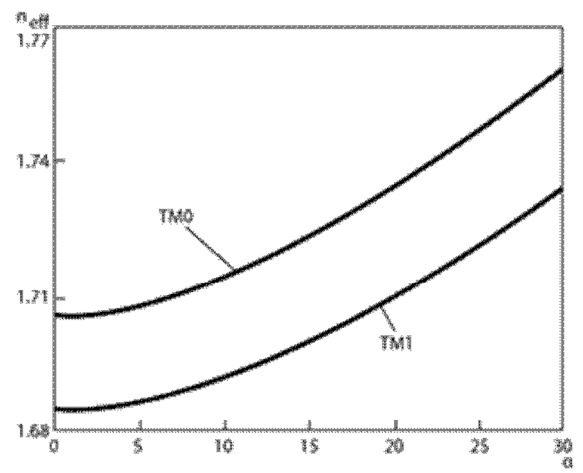


Fig. 4b