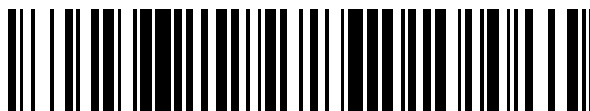


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 745 069**

51 Int. Cl.:

G02B 6/12 (2006.01)

G02B 6/30 (2006.01)

G02B 6/293 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.09.2012 PCT/EP2012/067971**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.03.2013 WO13037900**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.09.2012 E 12759119 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.06.2019 EP 2756340**

54 Título: **Acoplador de rejilla de guías de onda fotónico integrado**

30 Prioridad:

13.09.2011 GB 201115784

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

27.02.2020

73 Titular/es:

**UNIVERSITEIT GENT (50.0%)
Sint-Pietersnieuwstraat 25
9000 Gent, BE y
IMEC VZW (50.0%)**

72 Inventor/es:

**BAETS, ROELAND;
VERMEULEN, DIEDRIK;
LI, YANLU y
DE KONINCK, YANNICK**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 745 069 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

Acoplador de rejilla de guías de onda fotónico integrado

Campo de la invención

5 La invención se refiere al campo de la fotónica integrada. Más particularmente se refiere a procedimientos y dispositivos para acoplar la radiación de un dispositivo de guía de ondas fotónico integrado a una fibra o al espacio libre o viceversa.

Antecedentes de la invención

10 La integración fotónica se considera una tecnología clave para el avance futuro en la tecnología de comunicación óptica. La reducción del tamaño de los bloques componentes ópticos permite circuitos fotónicos ultracompactos, rentables y complejos, es decir, chips que comprenden componentes ópticos integrados formados en, o sobre, un sustrato y que están interconectados por guías de onda planas. Típicamente es deseable poder acoplar ópticamente las señales conducidas por dichas guías de onda planas en la entrada o en la salida del chip integrado, por ejemplo desde o hacia una fibra óptica.

15 La elección de una plataforma adecuada para desarrollar esta tecnología de miniaturización está guiada por la funcionalidad, compatibilidad, rendimiento, productividad y coste. Actualmente, el silicio sobre aislante (SOI) se puede considerar como la tecnología líder para la integración fotónica de bajo coste y alto volumen, ya que se beneficia de los procesos desarrollados en la industria electrónica madura. Aunque el alto contraste del índice de refracción del SOI reduce considerablemente la distribución del espacio de los dispositivos fotónicos integrados, se hace más difícil lograr un convertidor del tamaño de modo de alto rendimiento entre una fibra óptica unimodo, con un área de sección transversal típica de $100 \mu\text{m}^2$, y una guía de ondas óptica integrada en un chip, con un área de sección transversal típica del orden de $0,1 \mu\text{m}^2$.

20 Una posible solución es un acoplador de rejilla que es una estructura periódica que acopla la luz en la salida del chip, p. ej., al espacio libre o a una fibra óptica. Se han probado acopladores de rejilla de fibra a chip con muy alta eficacia. Sin embargo, una reflexión típica de vuelta en la guía de ondas en un chip para un acoplador de rejilla de tan alta eficacia puede ser de alrededor de -17dB , mientras que también se han presentado altas reflexiones de vuelta de -10dB y -8dB . Estos niveles de reflexión de vuelta pueden ser inaceptables en circuitos integrados, especialmente, por ejemplo, en circuitos que contienen láseres integrados o que implementan diseños basados en interferómetro.

25 Para los acopladores de rejilla, dos fuentes principales pueden contribuir a la reflexión de vuelta, es decir, la reflexión de vuelta hacia la guía de ondas. La reflexión de segundo orden de la rejilla puede considerarse la fuente dominante. Típicamente, esta reflexión de segundo orden puede eliminarse inclinando la fibra óptica en un ángulo pequeño de alrededor de 10° con respecto a la superficie normal. La segunda fuente de reflexión de vuelta se debe a la reflexión de Fresnel en la interfaz del acoplador de rejilla. Esta reflexión puede depender mucho de la estructura de rejilla en sí misma y, por lo tanto, puede ser muy difícil de eliminar.

30 Además de optimizar la eficacia de reflexión y acoplamiento, también hay un incentivo para reducir aún más el tamaño de los circuitos fotónicos integrados. En "compact focusing grating couplers for Silicon-on-Insulator integrated circuits" de F. Van Laere y col. en IEEE Photonics Technology Letters 19 (23) 2007 pág. 1919-1921, se presenta un acoplador de rejilla de enfoque compacto que utiliza una rejilla curva para enfocar la luz acoplada en una guía de ondas unimodo, logrando una reducción de longitud de ocho veces en comparación con una rejilla lineal convencional con cono adiabático sin penalización por rendimiento. Más específicamente, esta rejilla está curvada elípticamente, es decir, comprende una pluralidad de crestas de rejilla que tienen un perfil elíptico. La radiación se acopla al acoplador de rejilla a lo largo de la dirección de los ejes largos de estas crestas de rejilla, y debido a la curvatura de la rejilla, la distancia entre la rejilla y la apertura de salida de la guía de ondas puede reducirse drásticamente.

35 En la patente de EE. UU. US7.184.627 B1, se describe un acoplador de rejilla, que comprende una pluralidad de elementos de dispersión, y al menos un reflector de Bragg distribuido para reflejar la radiación que atraviesa la rejilla hacia el sustrato del acoplador de rejilla de vuelta hacia la rejilla.

40 En el documento US 5.392.308 se describe un láser semiconductor que tiene una heteroestructura de diodo amplificador de luz con una zona de ganancia acampanada en una cavidad resonante externa. Las reflexiones de vuelta se minimizan usando un acoplador de guía de ondas con una porción de guiado de la guía de ondas incrustada y una rejilla bidimensional que tiene una pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos con una curvatura que coincide con los frentes de fase curvos de las ondas de luz que se propagan en la sección de ganancia acampanada. En el documento US 6.285.813 se describe una rejilla de volumen para usar como un acoplador óptico y un procedimiento para crear el mismo. En el documento US2004/042377 se describe un cabezal óptico integrado. El cabezal óptico comprende un acoplador de entrada y un acoplador de salida.

Resumen de la invención

Es un objetivo de las realizaciones de la presente invención proporcionar buenos procedimientos y dispositivos basados en guía de ondas fotónicos integrados para acoplar la radiación hacia y desde el espacio libre o una fibra.

5 Una ventaja de los acopladores de rejilla según las realizaciones de la presente invención es que las reflexiones de vuelta, p. ej., las reflexiones de segundo orden y las reflexiones de Fresnel, pueden enfocarse lejos de la entrada de guía de ondas en la guía de ondas integrada.

Es una ventaja de las realizaciones según la presente invención que las reflexiones, que se reflejan de vuelta en una guía de ondas integrada, pueden evitarse o incluso extinguirse sustancialmente sin sacrificar la eficacia de acoplamiento de la rejilla.

10 Una ventaja de las realizaciones según la presente invención es que la radiación puede acoplarse en la salida de un circuito fotónico integrado que comprende un láser integrado con efectos adversos insignificantes de la radiación que se refleja de vuelta en el circuito en el acoplamiento de salida.

15 Una ventaja de las realizaciones según la presente invención es que la radiación puede acoplarse en la salida de un circuito óptico integrado que tiene un diseño basado en interferómetro con efectos adversos insignificantes de la radiación que se refleja de vuelta en el circuito en el acoplamiento de salida.

Una ventaja de las realizaciones según la presente invención es que se pueden obtener una o más de las ventajas anteriores, mientras que el acoplador de rejilla todavía permite una buena miniaturización del circuito fotónico integrado.

El objetivo anterior se consigue mediante un procedimiento y dispositivo según la presente invención.

20 La presente invención se refiere a un dispositivo fotónico integrado, el dispositivo fotónico integrado que comprende una guía de ondas incrustada en un sustrato fotónico, la guía de ondas que tiene una superficie de salida de radiación de la guía de ondas y la guía de ondas está conectada ópticamente a una rejilla bidimensional, una rejilla bidimensional que tiene una pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos, dicha rejilla bidimensional está adaptada para difractar la radiación recibida desde la guía de ondas hacia una dirección fuera de la superficie en la que está incrustada la rejilla bidimensional de dicho sustrato fotónico, en el que los elementos de dispersión alargados curvos están orientados con respecto a la guía de ondas de manera que, para los puntos de los elementos de dispersión que pueden irradiarse mediante radiaciones provenientes en la guía de ondas, las líneas normales (B) al menos al elemento de dispersión alargado curvo más cercano a la superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) no intersecan con dicha superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) de dicha guía de ondas en al menos el 50% de los puntos iluminados y caracterizado por que al menos uno de la pluralidad de elementos de dispersión alargados (3) forma al menos una parte de una elipse que tiene un primer punto de enfoque colocado sustancialmente en dicha superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) y que tiene un eje principal que forma un ángulo diferente de 0 radianes con un eje longitudinal de la guía de ondas, en el que el ángulo entre el eje principal y el eje longitudinal de la guía de ondas está entre 10° y 170°. Es una ventaja de las realizaciones según la presente invención que la reflexión de vuelta a la guía de ondas se reduce o incluso se evita, permitiendo así, p. ej., el mal funcionamiento de otros componentes ópticos en el circuito fotónico integrado.

35

Al menos uno de la pluralidad de elementos de dispersión alargados puede formar al menos una parte de una elipse que tiene un primer punto de enfoque colocado sustancialmente en dicha superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) y que tiene un eje principal que forma un ángulo diferente de 0 radianes con un eje longitudinal de la guía de ondas.

40 El ángulo puede ser mayor que la mitad de la suma del ángulo de divergencia de la luz que emana de dicha guía de ondas y la relación del diámetro máximo de la superficie extrema de la guía de ondas sobre la distancia focal entre la superficie de rejilla y la superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S).

El ángulo puede determinarse teniendo en cuenta

$$\Psi(r) \propto \iint_{\text{apertura}} E_{\text{inc}}(x', y') \frac{e^{ik|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} dx' dy' ,$$

45 mediante el cual cada punto de la apertura, que es la superficie de salida de radiación de la guía de ondas, actuará como un punto de origen y $\Psi(r)$ es la intensidad de campo de la radiación proveniente de la superficie de salida S en la posición r. La integración se realiza sobre la zona de la apertura ponderada por la intensidad de campo $E_{\text{inc}}(x', y')$ del modo.

En algunas realizaciones, el ángulo entre el eje principal y el eje longitudinal de la guía de ondas puede estar entre 25° y 155° o entre 45° y 135°.

La rejilla puede ser una rejilla elíptica. Una ventaja de las realizaciones según la presente invención es que se puede usar una rejilla que tenga una forma convencional, p. ej., una forma elíptica.

- 5 La rejilla se puede adaptar para difractar la radiación recibida desde la guía de ondas fuera de la superficie en la que está incrustada la rejilla bidimensional de dicho circuito fotónico integrado y hacia una dirección que forma un ángulo mayor de 0° con una superficie normal a dicha superficie de rejilla bidimensional.

El dispositivo fotónico integrado además puede comprender un láser integrado conectado ópticamente a dicha guía de ondas. El sustrato fotónico puede ser un sustrato de silicio sobre aislante.

- 10 La pluralidad de elementos de dispersión alargados puede comprender líneas grabadas en un sustrato fotónico.

La pluralidad de elementos de dispersión alargados puede comprender tiras de material depositadas encima de un sustrato fotónico. Las tiras de material depositadas pueden ser cualquier material adecuado, como por ejemplo tiras de metal o tiras de material dieléctrico como silicio u óxido de silicio. El material depositado normalmente se selecciona de manera que introduzca una periodicidad de índice de refracción.

- 15 La presente invención también se refiere a un sistema óptico que comprende un dispositivo fotónico integrado como se describe anteriormente y una fibra óptica en comunicación óptica con el dispositivo fotónico integrado para recoger la radiación dirigida desde la guía de ondas mediante la rejilla 2D.

- 20 La presente invención se refiere además a un procedimiento para acoplar la radiación de una guía de ondas incrustada en un dispositivo fotónico integrado fuera de dicho dispositivo, el procedimiento que comprende dirigir la radiación recibida desde dicha guía de ondas a través de una superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) hacia una rejilla bidimensional, la rejilla bidimensional está adaptada para difractar la radiación recibida desde la guía de ondas hacia una dirección fuera de la superficie de dicho dispositivo fotónico integrado en el que está incrustada la rejilla bidimensional, y la rejilla bidimensional que comprende una pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos que están orientados con respecto a la guía de ondas de manera que, para los puntos de los elementos de dispersión que pueden irradiarse mediante radiaciones provenientes de la guía de ondas, las líneas normales al menos al elemento de dispersión alargado curvo más cercano a la superficie de salida de radiación de la guía de ondas no intersecan con dicha salida de radiación de la guía de ondas superficie (S) de dicha guía de ondas en al menos el 50% de los puntos iluminados, y acoplar dicha radiación usando dicha rejilla bidimensional fuera de la superficie de dicho dispositivo fotónico integrado en el que está incrustada la rejilla bidimensional. El procedimiento se caracteriza por que dicho
- 25 direccionamiento es dirigir la radiación hacia la rejilla bidimensional en la que al menos uno de la pluralidad de elementos de dispersión alargados (3) forma al menos una parte de una elipse que tiene un primer punto de enfoque colocado sustancialmente en dicha salida de radiación de la guía de ondas superficie (S) y que tiene un eje principal que forma un ángulo diferente de 0 radianes con un eje longitudinal de la guía de ondas, en el que el ángulo entre el eje principal y el eje longitudinal de la guía de ondas está entre 10° y 170°.
- 30

- 35 La presente invención también se refiere al uso de un dispositivo fotónico integrado como se ha descrito anteriormente para acoplar en la salida o acoplar en la entrada la radiación desde o hacia un dispositivo fotónico integrado.

Los aspectos particulares y preferidos de la invención se exponen en las reivindicaciones independientes y dependientes adjuntas.

- 40 Estos y otros aspectos de la invención serán evidentes y se esclarecerán en referencia a las realizaciones que se describen a continuación.

Breve descripción de los dibujos

La FIG. 1 ilustra un dispositivo fotónico integrado adaptado para reducir la reflexión o incluso evitar la reflexión de vuelta en la entrada de guía de ondas, según una realización de la presente invención.

- 45 La FIG. 2 muestra una rejilla curvada elípticamente de ejemplo, como se puede usar en realizaciones de la presente invención.

La FIG. 3 y 4 ilustra esquemáticamente una comparación entre la reflexión de la rejilla curvada elípticamente que se muestra en la FIG. 2, usada en una guía de ondas alineada con el eje (FIG. 3) y usada en una guía de ondas fuera del eje, esta última según una realización de la presente invención, así como el diagrama k correspondiente para $z=0$.

- La FIG. 5 muestra espectros de reflexión simulados para acopladores de rejilla curvados elípticamente poco profundos, para diferentes valores del ángulo de guía de ondas, ilustrando las ventajas de las realizaciones de la presente invención.
- 5 La FIG. 6 muestra espectros de reflexión simulados para acopladores de rejilla curvados elípticamente totalmente grabados, para diferentes valores del ángulo de guía de ondas, ilustrando las ventajas de las realizaciones de la presente invención.
- La FIG. 7 muestra secciones transversales del campo eléctrico para un acoplador de rejilla curvado elípticamente y grabado poco profundo para diferentes ángulos de guía de ondas, ilustrando las ventajas de las realizaciones según la presente invención.
- 10 La FIG. 8 ilustra un acoplador de rejilla de prueba ejemplar que tiene un ángulo acimutal de 20° entre la guía de ondas y la rejilla curva elíptica, ilustrando otro ejemplo de una realización según la presente invención.
- La FIG. 9 muestra dos estructuras diferentes usadas en una configuración experimental para la comparación, que es un acoplador de rejilla de la técnica anterior (arriba) y un acoplador de rejilla según realizaciones de la presente invención (abajo).
- 15 La FIG. 10 muestra una vista detallada de un pico en las funciones de autocorrelación de las señales reflejadas de tres estructuras diferentes de prueba debido a reflexiones en el acoplador de rejilla de entrada, ilustrando las características y ventajas de las realizaciones según la presente invención.
- La FIG. 11 muestra una vista detallada de un pico en las funciones de autocorrelación de las señales reflejadas de tres estructuras de prueba diferentes debido a reflexiones en el fondo del chip.
- 20 La FIG. 12 muestra una vista detallada de un pico en las funciones de autocorrelación de las señales reflejadas de tres estructuras de prueba diferentes debido a reflexiones en los acopladores de rejilla del lado derecho.
- La FIG. 13 ilustra los parámetros de geometría del acoplador de rejilla de enfoque tal como se usan en un ejemplo para describir reglas de diseño ejemplares, tal como se puede usar en una realización de la presente invención.
- 25 La FIG. 14 ilustra la reflexión desde acopladores de rejilla curvos para diferentes ángulos de guía de ondas, como se usa en realizaciones de la presente invención.
- La FIG. 15a y la FIG. 15b muestra el ángulo de reflexión en función de δ_0 (FIG. 15a) y el ángulo óptimo de entrada de guía de ondas y correspondiente θ_0 en función de Φ , tal como se puede usar en realizaciones de la presente invención.
- 30 La FIG. 16a y la FIG. 16b muestra los espectros de reflexión para parejas de rejillas totalmente grabadas a poca profundidad, cada vez para valores diferentes del ángulo de la guía de ondas σ y del ángulo de inclinación de la fibra Φ , como se puede obtener usando realizaciones de la presente invención.
- La FIG. 17 describe los acopladores de rejilla de enfoque inclinados con diferentes acimuts que ilustran la luz entrante de la guía de ondas y las reflexiones de Fresnel en los límites, tal como se puede usar en las realizaciones de la presente invención.
- 35 La FIG. 18 ilustra las desviaciones de radio de las rejillas para diferentes diseños de FGC, según una realización de la presente invención.
- La FIG. 19 muestra la eficacia máxima del acoplamiento de acoplador de rejilla a fibra para diferente valor q_0 cuando la anchura de la apertura de entrada de guía de ondas se establece en $0,9 \mu\text{m}$, tal como se puede usar en una realización de la presente invención.
- 40 La FIG. 20 muestra los acopladores de rejilla con acimuts diferentes (a) en el que en cada muestra el acoplador de rejilla de entrada es el mismo que el acoplador de rejilla de salida y (b) en el que en cada muestra el acoplador de rejilla de entrada siempre tiene $\alpha=0$, ilustrando características de realizaciones de la presente invención.
- La FIG. 21 ilustra las eficacias de transmisión máximas y las longitudes de onda correspondientes de los acopladores de rejilla.
- 45 La FIG. 22 ilustra la configuración utilizada para medir reflexiones, tal como se usa en experimentos, ilustrando características de realizaciones de la presente invención.

La FIG. 23 ilustra la reflexión para diferentes acimuts, ilustrando características de realizaciones de la presente invención.

Los dibujos son solo esquemáticos y no limitantes. En los dibujos, el tamaño de algunos de los elementos puede ser exagerado y no dibujado a escala con fines ilustrativos.

5 Cualquier signo de referencia en las reivindicaciones no se interpretará como limitante del alcance.

En los diferentes dibujos, los mismos signos de referencia se refieren a elementos iguales o análogos.

Descripción detallada de las realizaciones ilustrativas

10 La presente invención se describirá con respecto a realizaciones particulares y en relación con ciertos dibujos, pero la invención no está limitada a los mismos sino solamente por las reivindicaciones. Los dibujos descritos son solo esquemáticos y no limitantes. En los dibujos, el tamaño de algunos de los elementos puede ser exagerado y no dibujado a escala con fines ilustrativos. Las dimensiones y las dimensiones relativas no se corresponden con las reducciones reales para poner en práctica la invención.

15 Además, los términos primero, segundo y similares en la descripción y en las reivindicaciones, se utilizan para distinguir entre elementos similares y no necesariamente para describir una secuencia, ya sea temporalmente, espacialmente, en una clasificación o de cualquier otra manera. Se ha de entender que los términos utilizados de esta manera son intercambiables en circunstancias adecuadas y que las realizaciones de la invención descritas en la presente memoria pueden funcionar en otras secuencias distintas de las descritas o ilustradas en la presente memoria.

20 Además, los términos superior, inferior y similares en la descripción y las reivindicaciones se utilizan con fines descriptivos y no necesariamente para describir posiciones relativas. Se ha de entender que los términos utilizados de esta manera son intercambiables en circunstancias adecuadas y que las realizaciones de la invención descritas en la presente memoria pueden funcionar en otras orientaciones distintas de las descritas o ilustradas en la presente memoria.

25 Debe observarse que el término "que comprende", utilizado en las reivindicaciones, no debe interpretarse como restringido a los medios enumerados después; no excluye otros elementos o etapas. Por lo tanto, debe interpretarse como que especifica la presencia de las características, números enteros, etapas o componentes indicados, pero no excluye la presencia o incorporación de una o más de otras características, números enteros, etapas o componentes, o grupos de los mismos. Así, el alcance de la expresión "un dispositivo que comprende los medios A y B" no debería limitarse a los dispositivos que consisten solo en los componentes A y B. Significa que con respecto a la presente invención, los únicos componentes pertinentes del dispositivo son A y B.

30 Además, las referencias en esta memoria descriptiva a "un ejemplo" significa que una función, estructura o característica particular descrita en relación con el ejemplo se incluye en, al menos, un ejemplo de la presente invención. Así, cuando aparecen frases como "en una realización" en diversos lugares de esta memoria descriptiva, no se refieren todas necesariamente a la misma realización, pero pueden. Además, las funciones, estructuras o características particulares pueden combinarse de cualquier manera adecuada, como sería evidente para una persona con experiencia ordinaria en la técnica de esta descripción, en una o más realizaciones.

35 De manera similar, debe tener en cuenta que, en la descripción de las realizaciones de ejemplo de la invención, diversas características de la invención a veces se agrupan en una única realización, figura o descripción de la misma con el fin de simplificar la descripción y ayudar en la comprensión de uno o más de los diversos aspectos de la invención. De manera similar, este procedimiento de descripción no debe interpretarse como si reflejara la intención que la invención reivindicada requiriese más características que las que se mencionan expresamente en cada reivindicación. Más bien, como reflejan las siguientes reivindicaciones, los aspectos de la invención residen en menos de todas las características de una única realización descrita anteriormente. Por lo tanto, las reivindicaciones que siguen a la descripción detallada se incorporan expresamente en esta descripción detallada, con cada reivindicación valiéndose por sí misma como una realización separada de esta invención.

El alcance de la invención solo está limitado por las reivindicaciones adjuntas.

45 En la descripción proporcionada en la presente memoria, se exponen numerosos detalles concretos. Sin embargo, se entiende que las realizaciones de la invención pueden ponerse en práctica sin estos detalles concretos. En otros casos, los procedimientos, estructuras y técnicas bien conocidos no se han mostrado en detalle para no oscurecer la comprensión de esta descripción.

50 Cuando en realizaciones de la presente solicitud se hace referencia a radiación, se hace referencia a radiación electromagnética. En algunas realizaciones, la radiación tiene un intervalo de longitud de onda o longitud de onda entre

400 nm y 10000 nm, aunque la invención no está limitada a los mismos. Cuando en realizaciones o aspectos de la presente invención se hace referencia a la óptica o a la luz, la presente invención también se refiere a realizaciones o aspectos similares para su uso con otra radiación.

5 Cuando en realizaciones de la presente solicitud se hace referencia a un circuito fotónico integrado (PIC) o dispositivo fotónico integrado, esto se refiere a una variedad de formas y sistemas de materiales tales como, p. ej., plataformas de guía de ondas con bajo índice de contraste (p. ej., guías de ondas de polímero, guías de ondas de sílice/vidrio, guías de ondas de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, guías de ondas de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$), guías de ondas con alto índice de contraste (p. ej., silicio sobre aislante, membranas semiconductoras), guías de ondas plasmónicas (p. ej., conjuntos de nanopartículas de metal, capas de metal), también llamadas circuitos de ondas de luz fotónicas (PLC). Otro ejemplo particular de una plataforma que se puede usar es la plataforma SiN. Los circuitos fotónicos integrados o los dispositivos fotónicos integrados según 10 las realizaciones de la presente invención comprenden al menos una guía de ondas integrada y una rejilla. Típicamente, también estarán presentes componentes adicionales como, por ejemplo, entre otros, una cavidad óptica integrada, un resonador óptico integrado, un interferómetro óptico integrado, un acoplador óptico integrado adicional, una guía de ondas adicional, un cono, un filtro sintonizable, un desfasador, una rejilla adicional, un modulador, un detector, una fuente, un multiplexor, un demultiplexor o una combinación de los mismos. Los componentes ópticos pueden ser activos o pasivos. Los componentes pueden integrarse, por ejemplo, de forma monolítica, heterogénea o híbrida. La integración monolítica es la tecnología de integración que utiliza un único flujo de procesamiento para procesar los diversos componentes que potencialmente utilizan diferentes materiales, p. ej., detectores de germanio integrados en CI de fotónica de silicio. La integración heterogénea es la tecnología de integración para la cual los componentes se procesan 15 en flujos de proceso separados, que luego se integran a nivel de troquel u oblea, p. ej., unión BCB, unión de obleas y otros esquemas de unión, integración 3D. La integración híbrida es la integración de componentes o materiales en plataformas fotónicas integradas procesadas, p. ej., flip chip de detectores, a presión, encolado, soldadura de hilos, coempaquetado, etc.

25 Los dispositivos y procedimientos de la presente invención se describen adicionalmente para el caso particular de un sistema de material de SOI (silicio sobre aislante), también denominado sistema de fotónica de silicio. Sin embargo, los dispositivos y procedimientos de la presente invención pueden basarse en otros sistemas de materiales, tales como, por ejemplo, sistemas de materiales III-V, capas metálicas, sistemas de materiales con bajo índice de contraste o una combinación de los mismos.

30 El silicio sobre aislante es un sistema de materiales muy interesante para circuitos fotónicos altamente integrados. El alto contraste del índice de refracción permite que las guías de onda fotónicas y los componentes de guía de ondas con dimensiones submicrométricas guíen, doblen y controlen la luz a una escala muy pequeña para que se puedan integrar diversas funciones en un chip. Además, el SOI ofrece una plataforma flexible para la integración con componentes basados en plasmón de superficie que a su vez permite niveles de miniaturización aún más altos. Ambos tipos de guía de ondas permiten un alto nivel de miniaturización, lo cual es ventajoso. Además, para ambos tipos de guía de ondas, la luz se puede acoplar eficazmente en la entrada y en la salida del PIC mediante el uso de rejillas. 35

40 El uso de silicio sobre aislante también tiene algunas ventajas tecnológicas. Debido a la industria CMOS, la tecnología de silicio ha alcanzado un nivel de madurez que supera a cualquier otra técnica de fabricación de chips planos en varios órdenes de magnitud en términos de rendimiento, reproducibilidad y capacidad de proceso. Los CI nanofotónicos se pueden fabricar con procesos a escala de obleas, lo que significa que una oblea puede contener una gran cantidad de circuitos fotónicos integrados. Combinado con la disponibilidad comercial de obleas grandes a un coste relativamente moderado, esto significa que el precio por circuito fotónico integrado puede ser muy bajo.

45 Cuando en realizaciones según la presente invención se hace referencia a una rejilla lineal o 1D, se hace referencia a una rejilla en la que las líneas de rejilla tienen una forma sustancialmente recta, es decir, se extienden sustancialmente en una dirección en el plano del dispositivo fotónico integrado.

50 Cuando en realizaciones según la presente invención se hace referencia a una rejilla curva o 2D, se hace referencia a una rejilla en la que las líneas de rejilla tienen una forma sustancialmente curva, es decir, se extienden sustancialmente en dos direcciones en el plano del dispositivo fotónico integrado.

55 En un primer aspecto, la presente invención se refiere a dispositivos fotónicos integrados, también denominados circuitos fotónicos integrados (PIC), dichos dispositivos que comprenden una rejilla y una guía de ondas integrada para acoplar la luz desde una guía de ondas integrada a una fibra óptica o al espacio libre. El dispositivo fotónico integrado comprende una guía de ondas incrustada en el sustrato fotónico. La guía de ondas tiene una superficie de salida de radiación de la guía de ondas y está conectada ópticamente a una rejilla bidimensional. La rejilla bidimensional, que forma parte del dispositivo fotónico integrado, tiene una pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos y está adaptada para difractar la radiación recibida desde la guía de ondas hacia una dirección fuera de la superficie de dicho sustrato fotónico en el que la rejilla bidimensional está incrustada. Según realizaciones de la presente invención, los elementos de

dispersión alargados curvos están orientados con respecto a la guía de ondas de manera que, para los puntos de los elementos de dispersión que pueden irradiarse mediante radiaciones provenientes de la guía de ondas, las líneas normales a los elementos de dispersión alargados curvos no intersecan con dicha superficie de salida de radiación de la guía de ondas de dicha guía de ondas en al menos el 50% de los puntos iluminados. A modo de ilustración, a continuación se describirán realizaciones de la presente invención que no se limitan a las mismas, características y ventajas con más detalle en referencia a la FIG. 1, indicando una realización de ejemplo de un dispositivo fotónico integrado.

La FIG. 1 ilustra una primera realización de ejemplo de un dispositivo fotónico integrado 1 según el primer aspecto de la invención. El dispositivo fotónico integrado 1 comprende una guía de ondas 4 incrustada en un sustrato fotónico. Como se ha indicado anteriormente, el dispositivo fotónico integrado puede basarse en un sustrato de silicio sobre aislante (SOI), aunque las realizaciones de la presente invención no están limitadas al mismo. El dispositivo fotónico integrado 1 puede comprender además otros componentes, como por ejemplo un láser integrado conectado ópticamente a esta guía de ondas 4.

La guía de ondas 4 puede ser, por ejemplo, una guía de ondas integrada unimodo, por ejemplo, una guía de ondas amplia en un sustrato de SOI. Esta guía de ondas 4 puede tener una porción extrema, por ejemplo dirigida a lo largo de un eje de guía de ondas A. La porción extrema se denomina además la superficie de salida de radiación de la guía de ondas. Debe observarse que la presente descripción aprovecha el concepto de acoplamiento de salida de la radiación en la salida del dispositivo fotónico integrado, pero que podría proporcionarse igualmente una descripción alternativa para una radiación acoplada en la entrada y los componentes y dispositivos descritos en las realizaciones de la presente invención se pueden utilizar igualmente para un acoplamiento de entrada de radiación en el dispositivo fotónico integrado. La guía de ondas está en comunicación óptica con una rejilla bidimensional, que también forma parte del dispositivo fotónico integrado. La guía de ondas está en comunicación óptica con una rejilla bidimensional a través de una superficie de salida de radiación de la guía de ondas S. La superficie de salida de radiación de la guía de ondas puede ser, por ejemplo, el extremo contiguo de la porción extrema de la guía de ondas.

La rejilla bidimensional puede ser parte de una porción de guiado 5 de material conductor ópticamente. La porción de guiado 5 puede ser una zona en una franja plana del sustrato fotónico, p. ej., en una continuación del sustrato fotónico en el que la guía de ondas 4 está incrustada.

La rejilla bidimensional 2 está adaptada para difractar radiación, p. ej., luz, recibida desde la guía de ondas 4 hacia una dirección fuera de dicho sustrato fotónico, p. ej., en una dirección que tiene un componente sustancialmente normal en relación con una superficie de la porción de guiado 5. La rejilla bidimensional 2 comprende una pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos 3, que pueden estar curvados de manera que un frente de onda simple que se desplaza a través de un modo polarizado TE o polarizado TM de la guía de ondas 4 pueda ser adaptado en fase a, por ejemplo, una fibra óptica inclinada colocada en dicha dirección fuera de dicho sustrato fotónico. Estos elementos de dispersión alargados 3 pueden comprender líneas grabadas en un sustrato fotónico en el que la porción de guiado 5 está incrustada. Alternativa o adicionalmente, esta pluralidad de elementos de dispersión alargados 3 puede comprender materiales depositados tales como, p. ej., realizaciones de la presente invención que no se limitan a las mismas, líneas de silicio o líneas metálicas, p. ej. líneas de oro depositadas, encima de un sustrato fotónico.

La pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos 3 están orientados de manera que las líneas normales B al menos al elemento de dispersión alargado curvo 3 más cercano a la superficie de salida de radiación de la guía de ondas S en los puntos que están iluminados por la radiación proveniente de la guía de ondas 4 no intersecan con la superficie de salida de radiación de la guía de ondas S. El requisito anterior es ventajosamente válido en al menos el 50% de los puntos iluminados, más ventajosamente al menos el 70% de los puntos iluminados, incluso más ventajosamente al menos el 90% de los puntos iluminados. Por ejemplo, dichas líneas normales B en puntos en el elemento de dispersión 3 dentro de un cono predeterminado alrededor del eje de la guía de ondas A correspondiente a un ángulo de divergencia de luz que emana de la superficie de salida de radiación de la guía de ondas S. Los elementos de dispersión alargados, por lo tanto, pueden tener una forma al menos parcialmente elíptica, al menos parcialmente de forma ovalada, o tener otra forma tal como, por ejemplo, una forma hiperbólica, una forma parabólica o cualquier función de segundo orden (u orden superior). Si los elementos de dispersión alargados curvos tienen la misma forma, el requisito de no intersección es válido para todos los elementos de dispersión alargados curvos. Sin embargo, también puede haber una diferencia en la primera línea de la rejilla con respecto a las siguientes líneas, ya que el índice de refracción efectivo en la zona de la rejilla puede ser diferente del índice de refracción en la zona de la franja. La luz transmitida en la primera línea de la rejilla será así difractada en la transición desde la franja a la zona de la rejilla. Esta difracción (según la ley de Snell) depende del ángulo. Dado que el ángulo de la luz incidente en la primera línea de la rejilla varía mucho, el ángulo de difracción también cambiará. En caso de que haya una variación de la forma de los elementos de dispersión alargados o para grandes diferencias en el índice de refracción efectivo en zonas de diferentes elementos de dispersión alargados, el requisito de no intersección de la normal es válido para al menos el elemento de dispersión alargado más cercano a la superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S).

5 En realizaciones particulares, al menos uno, pero también más o la totalidad, de la pluralidad de elementos de dispersión alargados 3 puede formar al menos una parte de una elipse que tiene un primer punto de enfoque colocado sustancialmente en la superficie de salida de radiación de la guía de ondas S y que tiene un eje principal que forma un ángulo con dicho eje de guía de ondas. En algunas realizaciones, la rejilla es una rejilla elíptica. En realizaciones preferenciales de la presente invención, este ángulo, medido en radianes, puede ser mayor que la mitad de la suma de un ángulo de divergencia de radiación que emana de la guía de ondas, p. ej., el ángulo de divergencia de salida de la guía de ondas, y la relación del diámetro máximo de la superficie de salida de radiación de la guía de ondas S, p. ej., la apertura de la guía de ondas, sobre la distancia focal de la elipse.

10 En algunas realizaciones según la presente invención, adicionalmente se realiza un compromiso para la anchura de la apertura. Dependiendo de la anchura de la apertura, el ángulo de difracción cambiará. Cuanto más pequeña es la apertura S, mayor es el ángulo de difracción y, por lo tanto, más cerca deben estar las líneas de la rejilla para que coincidan con un cierto tamaño de modo de, por ejemplo, una fibra óptica. Esto significa que el punto de reenfoque de la reflexión está muy cerca de la apertura de entrada de guía de ondas, lo que no es favorable para la reducción de la reflexión. Por otro lado, si se aumenta la anchura de la apertura, el ángulo de difracción disminuirá y, por lo tanto, las líneas de rejilla se pueden colocar más lejos de la apertura. En ese caso, el punto de reenfoque estará más lejos de la apertura de entrada, lo que es favorable para la reducción de la reflexión. En la práctica, se realiza un compromiso, ya que el aumento de la anchura de la apertura aumentará la posibilidad de que haya luz reflejada capturada de vuelta hacia la entrada de la guía de ondas (puesto que la anchura de la apertura es mayor).

20 La rejilla bidimensional 2 puede adaptarse para difractar radiación, p. ej., luz, recibida desde la guía de ondas 4 hacia una dirección que forma un ángulo con una superficie normal del sustrato fotónico, p. ej., una superficie superior de una franja de sustrato fotónico en la que la porción de guiado 5 está incrustada, mayor que 0°, p. ej., en un ángulo de aproximadamente 10° con respecto a la superficie normal. El dispositivo fotónico integrado 1 puede comprender además una fibra óptica, conectada ópticamente a la porción de guiado plana 5 para recoger la radiación dirigida desde la guía de ondas 4 mediante la rejilla 2D.

25 Cuando la rejilla bidimensional 2 está curvada elípticamente, es decir, comprende una pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos 3, p. ej., crestas de rejilla, que tienen un perfil elíptico, acoplar la radiación en el acoplador de rejilla a lo largo de la dirección de los ejes largos de estas crestas de rejilla puede parecer la opción más lógica. Sin embargo, se ha encontrado que desviarse de este diseño puede evitar una gran reflexión de vuelta ya que la reflexión de las líneas de rejilla se reenfoque a los segundos puntos focales lo cual, para una guía de ondas no colocada a lo largo del eje largo, da como resultado que la radiación reflejada no se acople de vuelta a la guía de ondas.

30 En un diseño con esta desviación, otra parte de las elipses confocales se usa como acoplador de rejilla, o en otras palabras, la guía de ondas se gira en un ángulo diferente de 0° con respecto al eje largo de las elipses, p. ej. sobre un ángulo α por ejemplo 45°. En este diseño, los puntos focales y la rejilla no están en línea, por lo tanto, la reflexión de la rejilla se enfoca lejos de la entrada de guía de ondas hacia una zona de franja, eliminando así por completo la reflexión de vuelta.

35 En un dispositivo fotónico integrado 1 según realizaciones de la presente invención, la rejilla bidimensional 2 puede así enfocar la luz reflejada lejos de la entrada de guía de ondas 4. La reflectancia promedio puede reducirse en 10 dB en dicho acoplador de rejilla en comparación con un acoplador de rejilla convencional similar, mientras que la transmitancia puede permanecer en el mismo nivel.

40 En algunas realizaciones según la presente invención, el ángulo entre la guía de ondas y un eje principal puede determinarse teniendo en cuenta

$$\Psi(r) \propto \iint_{\text{apertura}} E_{\text{inc}}(x', y') \frac{e^{ik|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} dx' dy',$$

45 mediante el cual cada punto de la apertura, que es la superficie de salida de radiación de la guía de ondas, actuará como un punto de origen y $\Psi(r)$ es la intensidad de campo de la radiación proveniente de la superficie de salida S en la posición r. La integración se realiza sobre la zona de la apertura ponderada por la intensidad de campo $E_{\text{inc}}(x', y')$ del modo. Teniendo en cuenta lo anterior y simulando la difracción en función de la anchura de la guía de ondas para una guía de ondas de nervaduras de SOI, se obtiene el siguiente ajuste para el ángulo de apertura:

$$2\delta = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\begin{array}{l} -0,013W^6 + 0,193W^5 - 1,145W^4 + 3,490W^3 \\ -5,664W^2 + 4,287W - 0,194 \end{array} \right)$$

con W la anchura de la guía de ondas. Se tomó la anchura del haz de media potencia (HPBW) para el ajuste, en cuyo caso el diámetro obtenido es la anchura completa del haz a la mitad de su intensidad máxima (FWHM).

5 El ángulo entre el eje principal y el eje longitudinal de la guía de ondas en algunas realizaciones puede estar entre 10° y 170° . En algunas realizaciones, el ángulo puede estar entre 25° y 155° o entre 45° y 135° . El ángulo puede depender de la apertura. El ángulo debe ser tal que la luz reflejada no coincida con la entrada de guía de ondas. Por lo tanto, el ángulo óptimo es donde el ángulo entre la luz incidente en la rejilla y la luz reflejada es máximo. Este ángulo puede ser ligeramente diferente de 90 grados. El ángulo exacto depende de la distancia entre los puntos focales de la primera línea de la rejilla. Por razones prácticas, como el encaminamiento de la guía de ondas, se pueden preferir ángulos más pequeños.

10 Los principios de trabajo teóricos de la presente invención se analizarán a continuación con fines de aclaración. Sin embargo, esta elaboración de principios no está destinada a ser interpretada como limitante de la invención de ninguna manera.

15 Como se ha descrito anteriormente, dos fuentes principales pueden contribuir a la reflexión de vuelta para los acopladores de rejilla, concretamente, la reflexión de segundo orden de la rejilla y la reflexión de Fresnel en la interfaz del acoplador de rejilla. En el diseño del acoplador de rejilla según realizaciones de la presente invención, estas dos fuentes de reflexión pueden enfocarse lejos de la entrada de guía de ondas, extinguiendo así la reflexión casi por completo.

20 En realizaciones particulares de la presente invención, la rejilla puede estar curvada elípticamente, es decir, puede comprender una pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos, p. ej., crestas de rejilla, que tienen un perfil elíptico. Estas crestas de rejilla pueden formar un conjunto de elipses que comparten la misma orientación, es decir, tienen ejes principales orientados en la misma dirección y comparten un punto focal, que puede coincidir preferentemente con un punto de salida de la guía de ondas, p. ej., el centro geométrico de la superficie extrema de la guía de ondas, como una superficie de interfaz donde una guía de ondas integrada puede acoplar la luz a una zona ópticamente conductora que contiene la rejilla. En sistemas similares conocidos en la técnica, la luz puede estar acoplada al acoplador de rejilla, p. ej., recibida de una guía de ondas integrada, p. ej., una guía de ondas de SOI amplia, a lo largo de la dirección de los ejes principales de estas crestas de rejilla. La curvatura de la rejilla es tal que la luz, que tiene una longitud de onda predeterminada, recibida de la guía de ondas se difracta en una dirección predeterminada fuera del plano en el que está incrustada la rejilla. Por ejemplo, en una dirección donde una fibra óptica inclinada puede conectarse ópticamente al sustrato. Esta curvatura de la rejilla es tal que un frente de onda simple que se origina a partir de una fibra óptica inclinada de este tipo se adapta en fase a los modos polarizados TE de una guía de ondas de SOI amplia, de manera que el frente de onda se curva cilíndricamente y el enfoque se produce en el centro de curvatura del frente de onda.

35 En referencia a la FIG. 2, cuando la superficie superior de la guía de ondas se elige que sea el plano (Y, Z) del lado derecho de un sistema de coordenadas cartesianas, con Z en el eje de la guía de ondas y el origen elegido que esté en un punto de salida de la guía de ondas, las líneas de rejilla pueden describirse mediante un conjunto de elipses confocales E_{q0} , E_{q0+1} , ..., E_{q0+n} con el punto focal común $f_{1,q0} = f_{1,q0+1} = \dots = f_{1,q0+n}$ en el origen. En el sistema de coordenadas descrito, este conjunto de elipses puede describirse mediante:

$$\frac{\left(z - \frac{q\lambda_0 n_t \sin \theta}{n_{eff}^2 - n_t^2 \sin^2 \theta} \right)^2}{\left(\frac{q\lambda_0 n_{eff}}{n_{eff}^2 - n_t^2 \sin^2 \theta} \right)^2} + \frac{y^2}{\left[\frac{q\lambda_0}{(n_{eff}^2 - n_t^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \right]^2} = 1$$

40 donde q es un número de índice entero para cada línea de rejilla, θ es el ángulo entre la fibra y la normal de la superficie del chip, n_t es el índice de refracción del entorno, λ_0 es la longitud de onda del vacío y n_{eff} es el índice de refracción efectivo que siente una onda cilíndrica en la zona ópticamente conductora que contiene la rejilla, p. ej., la franja y el área de rejilla. La posición de los segundos puntos focales viene dada por:

$$f_{2,q}(z, y) = \left(\frac{2q\lambda_0 n_i \sin \theta}{n_{eff}^2 - n_i^2 \sin^2 \theta}, 0 \right).$$

- La condición de coincidencia de fases se cumple para todas las partes de las elipses. Por lo tanto, cualquier parte de las elipses se puede usar para diseñar un acoplador de rejilla, puesto que cada parte de la elipse acoplará la luz bajo el mismo ángulo ϑ . En los planteamientos convencionales conocidos en la técnica, se puede usar la parte centrada alrededor de los ejes principales de las elipses, es decir, centrada alrededor del lado positivo del eje z en el sistema de coordenadas introducido, como se muestra en la FIG. 3, de manera que el vector de propagación $\vec{\beta}$ de la entrada de guía de ondas sea paralela al vector de onda proyectado $\vec{k}_{m,z}$ de la luz difractada, p. ej., el ángulo de la guía de ondas $\alpha = 0$. Aunque esto parece una opción razonable, se descubrió que este diseño puede introducir una reflexión de vuelta máxima, ya que la reflexión de las líneas de rejilla se reenfocherà a los segundos puntos focales y se acoplará de vuelta a la entrada de guía de ondas. Según realizaciones de la presente invención, esto se evita utilizando otra parte de dichas elipses confocales como un acoplador de rejilla, p. ej., girando la guía de ondas con un ángulo α , por ejemplo $\alpha = 45^\circ$, con respecto a los ejes principales de las elipses, como se ilustra en la FIG. 4. En dicho diseño, los puntos focales y la rejilla no están en línea y, por lo tanto, la reflexión de la rejilla se enfoca lejos de la entrada de guía de ondas hacia una zona de la franja, eliminando así la reflexión de vuelta.
- A continuación, se analizarán varios ejemplos ilustrativos. Estos ejemplos están destinados a esclarecer los modos de reducción para poner en práctica la presente invención, y no están destinados a limitar la invención de ninguna manera.
- En un primer ejemplo, se simuló acopladores de rejilla elípticos según realizaciones de la presente invención usando el software FDTD 3D completamente vectorial, p. ej., usando el paquete flexible de software libre "Meep" para las simulaciones electromagnéticas. Para calcular los espectros de reflexión, se lanzó un pulso con un perfil de tiempo gaussiano en una guía de ondas de acceso unimodo y se midió el flujo reflejado en esa misma guía de ondas. La FIG. 5 muestra los espectros de reflexión del acoplador de rejilla para diferentes ángulos de guía de ondas α con respecto al eje principal para rejillas grabadas a poca profundidad, es decir, grabado de 70 nm en un núcleo de Si de 220 nm. La reflexión de vuelta, como se puede observar en la FIG. 5, disminuye alrededor de 10 dB a 15 dB, es decir, por debajo de -45 dB, cerca de 1550 nm, logrando así un rendimiento típico de reflexión de vuelta comparable al de los conectores de fibra óptica típicos (-40 dB), sin introducir una penalización por eficacia de acoplamiento.
- En la FIG. 6, para rejillas totalmente grabadas, es decir, en un núcleo de Si de 220 nm, se muestra que la reflexión de vuelta disminuye de -5 dB, correspondiente a rejillas altamente reflectantes, a -25 dB. Estas rejillas pueden ser especialmente útiles para circuitos integrados. La eficacia de acoplamiento se calculó excitando una onda continua de frecuencia única en la guía de ondas de acceso y calculando la superposición entre el campo óptico encima del acoplador y el perfil de modo de una fibra unimodo ($\vartheta \approx 15^\circ$), normalizado a la potencia en la guía de ondas de acceso. Se descubrió que el diseño de grabado poco profundo sin sustrato tenía una eficacia de acoplamiento del 33% independiente del ángulo de la guía de ondas α .
- En un segundo ejemplo ilustrativo, se usa una matriz de rejillas elípticas en SOI para acoplar un campo óptico entre una guía de ondas unimodo y una fibra unimodo. Dado que la condición de coincidencia de fases de las rejillas curvas se cumple para todas las partes de las elipses confocales, el eje longitudinal de la entrada de guía de ondas con respecto al eje largo de las elipses puede inclinarse α para usar otra parte de la rejilla en el acoplamiento. Para $\alpha \gg 0$, las reflexiones se pueden reenfochar lejos de la entrada de guía de ondas, y se acoplará menos reflexión a la entrada de guía de ondas.
- Un acoplador de rejilla en SOI según realizaciones de la presente invención con un ángulo acimutal $\alpha = 20^\circ$ se muestra en la FIG. 8. Este acoplador de rejilla se fabricó con litografía DUV de 193 nm. La capa superior de silicio tenía una altura de 220 nm, y las curvas en la zona de la rejilla eran zanjas grabadas a poca profundidad con un espesor de silicio de 150 nm. No se cubrió ningún revestimiento encima de la rejilla. La distancia desde la entrada de guía de ondas hasta la primera rejilla fue de 24,8 μm , y el ángulo de divergencia de las rejillas fue de alrededor de 40,0°.
- Para reducir las reflexiones, la entrada de guía de ondas profundamente grabada se estrechó a una apertura grabada a poca profundidad. La anchura de la apertura se estableció en 0,9 μm para asegurarse de que la luz que llegaba a la rejilla coincidía en modo con el modo en una fibra unimodo. La entrada de guía de ondas se conectó a un acoplador de rejilla estándar desde el lado izquierdo, como se muestra, a través de un cono de 2 mm de largo. Se fabricó un acoplador de rejilla de enfoque normal con el mismo acoplador y cono de rejilla de entrada para comparar con el acoplador de rejilla. La separación entre el acoplador de rejilla normal y el acoplador de rejilla de entrada fue $L = 2,04$ mm. Las cuatro curvas con radios de 5 mm en la estructura de prueba del acoplador de rejilla correspondiente a las realizaciones de la

presente invención se usaron para marcar la distancia L . Ambos acopladores de rejilla se diseñaron para funcionar a $1,55 \mu\text{m}$.

La luz de un láser sintonizable, que escanea de 1490 nm a 1570 nm con un incremento de 20 pm , se envió a los acopladores de rejilla estándar de entrada desde fibra unimodo de conexión en espiral. Otra fibra se alineó con los acopladores de rejilla del lado derecho para medir los espectros de transmisión. Los máximos de transmisión para ambos acopladores de rejilla de prueba estaban dentro de 1540 nm y 1550 nm como se esperaba. Sus pérdidas de inserción (alrededor de -10 dB) y anchos de banda de 3 dB (50 nm) también estaban en el mismo nivel.

Las reflexiones se extrajeron por medio de un circulador. Para evitar reflexiones adicionales, se eliminó la fibra de conexión en espiral del lado derecho en la medición de la reflexión. La información de reflexión en el dominio del espacio podría extraerse de las funciones de autocorrelación del espectro reflejado. Se realizaron tres etapas antes de calcular la autocorrelación: 1. Una primera etapa para convertir los espectros de reflexión del dominio de longitud de onda en el dominio de la frecuencia, utilizando la función de interpolación lineal. 2. Una segunda etapa para multiplicar una ventana gaussiana a las reflexiones en el dominio de la frecuencia, para suprimir las pérdidas numéricas. 3. Una tercera etapa de relleno de ceros a fin de obtener una malla de frecuencias más densa en la función de autocorrelación, lo cual es bueno para estimar el ancho de banda de 3 dB de los picos. La autocorrelación $R(z)$ se obtuvo de este modo aplicando la transformación inversa de Fourier al espectro de reflexión preparado. El índice de grupo utilizado en el cálculo fue el índice de grupo promedio a lo largo del cono, que se estimó en $3,75$. La autocorrelación de un espectro de reflexión de referencia, que se midió iluminando el láser directamente en un área vacía (sin patrones) en el mismo chip, también se calculó para la comparación. La reflectancia calculada fue un valor promedio para longitudes de onda entre 1490 nm y 1570 nm .

Las interferencias entre el campo reflejado desde la interfaz fibra-aire y la distribución espacial del campo reflejado a lo largo de las estructuras de prueba podrían extraerse de los picos que aparecen en las funciones de autocorrelación. El primer pico cerca de $z=15 \mu\text{m}$ fue causado por la interferencia entre las reflexiones de la interfaz fibra-aire y las del acoplador de rejilla de entrada, que se muestra en la FIG. 10. Como no había un acoplador de rejilla de entrada en la medición de referencia, este pico no apareció en la curva de referencia. Otro pico apareció para $z \approx 0,71 \text{ mm}$, que se encuentra en todas las curvas de autocorrelación. Fue causado por la interferencia entre las reflexiones de la interfaz fibra-aire y las del fondo del chip, como se muestra en la FIG. 11. El pico para $z \approx 2,1 \text{ mm}$ fue causado por la interferencia entre las reflexiones de la interfaz fibra-aire y las de los acopladores de rejilla de prueba y, por lo tanto, no apareció en la autocorrelación de la medición de referencia, véase la FIG. 12. Se puede encontrar que el pico del acoplador de rejilla según realizaciones de la presente invención es menor que el del acoplador de rejilla de la técnica anterior. La reflectancia integrada sobre la anchura de línea de 3 dB de los picos ilustra que la reflectancia promedio del acoplador de rejilla según realizaciones de la presente invención es $9,5 \text{ dB}$ menos que la del acoplador de rejilla convencional. La reflectancia de las cuatro curvas en la estructura de prueba también fue bastante grande como se muestra en la FIG. 12.

En el acoplador de rejilla según realizaciones de la presente invención con un ángulo acimutal (ángulo entre el eje longitudinal de la guía de ondas y el eje largo) de 20° , la reflectancia promedio entre 1490 nm y 1570 nm fue $9,5 \text{ dB}$ menos que la del acoplador de rejilla de enfoque de la técnica anterior, mientras que su transmitancia no se redujo. Según las simulaciones, p. ej., como se ilustra en la FIG. 5 y la FIG. 6, aumentar el ángulo acimutal puede reducir aún más las reflexiones.

En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un sistema óptico para guiar la radiación hacia o desde un dispositivo fotónico integrado. El sistema óptico comprende un dispositivo fotónico integrado según una realización del primer aspecto. Está en comunicación óptica con una fibra óptica. De este modo, la fibra puede estar conectada ópticamente al dispositivo fotónico integrado. Otras características y ventajas pueden ser como se describe en referencia al primer aspecto.

En un tercer aspecto, la presente invención se refiere a un procedimiento para acoplar la radiación de una guía de ondas incrustada en un dispositivo fotónico integrado fuera del dispositivo fotónico integrado o hacia el dispositivo fotónico integrado. El procedimiento comprende dirigir la radiación recibida desde la guía de ondas a través de una superficie de salida de radiación de la guía de ondas hacia una rejilla bidimensional. De este modo, la rejilla bidimensional está adaptada para difractar la radiación recibida desde la guía de ondas hacia una dirección fuera de la superficie de dicho dispositivo fotónico integrado en el que está incrustada la rejilla bidimensional, y la rejilla bidimensional comprende una pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos que están orientados con respecto a la guía de ondas de manera que, para los puntos de los elementos de dispersión que pueden irradiarse mediante radiaciones provenientes de la guía de ondas, las líneas normales a los elementos de dispersión alargados curvos no intersecan con dicha superficie de salida de radiación de dicha guía de ondas en al menos el 50% de los puntos iluminados. El procedimiento también comprende acoplar la radiación fuera de dicho dispositivo fotónico integrado utilizando la rejilla bidimensional. Direccionamiento es dirigir la radiación hacia la rejilla bidimensional en la que al menos uno de la pluralidad de

elementos de dispersión alargados forma al menos una parte de una elipse que tiene un primer punto de enfoque colocado sustancialmente en dicha salida de radiación de la guía de ondas superficie (S) y que tiene un eje principal que forma un ángulo diferente de 0 radianes con un eje longitudinal de la guía de ondas, en el que el ángulo entre el eje principal y el eje longitudinal de la guía de ondas está entre 10° y 170°.

5 En otro aspecto, la presente invención también se refiere al uso de un dispositivo fotónico integrado como se describe en el primer aspecto, para guiar la radiación hacia o desde una guía de ondas en el dispositivo fotónico integrado. Otras características y ventajas del dispositivo fotónico integrado y el uso del mismo pueden ser como se indica en los aspectos anteriores.

10 Además, a modo de ilustración, las realizaciones que no se limitan a las mismas, las reglas de diseño para diseñar acopladores de rejilla sin reflexión según al menos algunas realizaciones de la presente invención se analizan a continuación, en el cual el diseño también se investiga mediante simulaciones 3D FDTD para el caso de una plataforma basada en silicio sobre aislante.

15 Para el acoplador de rejilla sin reflexión del presente ejemplo, se siguen las siguientes reglas de diseño. La rejilla está curvada de manera que un frente de onda simple que se origina a partir de la fibra óptica inclinada se adapta en fase al modo polarizado TE de una guía de ondas SOI amplia, de manera que el frente de onda se curva cilíndricamente y el enfoque se produce en el centro de curvatura del frente de onda. La luz se refracta y se refleja en la primera elipse de rejilla E_{q_0} . τ y η son la línea tangente y normal respectivamente de la elipse E_{q_0} en el punto (r_0, δ_0) . La forma más fácil de describir este sistema es usar un sistema de coordenadas polares (r, δ) con el origen colocado en el punto de salida de la entrada de guía de ondas, como se muestra en la Fig. 13. El haz se expandirá en la zona de la franja con un índice de refracción efectivo n_s y después de cierta longitud r_0 se encontrará con la rejilla, experimentando así un índice de refracción efectivo diferente n_g . Como primera aproximación, suponemos que estos índices de refracción efectivos n_s y n_g son iguales y por lo tanto $\alpha = 180^\circ$. La condición de coincidencia de fases es ahora:

$$q\lambda_0 = rn_s - r \cos \delta n_c \sin \phi$$

25 donde λ_0 es la longitud de onda del vacío y q es un número entero correspondiente a cada línea de rejilla. La fibra se inclina en un ángulo Φ , el ángulo entre la fibra y la superficie del chip es normal, de manera que la constante de propagación proyectada de la fibra solo tiene un componente z proporcional a $n_c \sin \Phi$ donde n_c es el índice de refracción del revestimiento superior. Al reescribir la ecuación anterior, se puede ver que las líneas de rejilla formarán las elipses confocales $E_{q_0}, E_{q_0+1}, \dots, E_{q_0+n}$:

$$r = \frac{\frac{q\lambda_0}{n_s}}{1 - \frac{n_c \sin \phi \cos \delta}{n_s}} = \frac{a(1-e^2)}{1-e \cos \delta}$$

30 con un punto focal común $f_{1,q}$ en el origen. De esto podemos determinar la excentricidad

$$e = \frac{n_c \sin \phi}{n_s}, \quad a = \frac{q\lambda_0 n_s}{n_s^2 - n_c^2 \sin^2 \phi} \quad \text{y los segundos puntos focales} \quad f_{2,q} = \frac{q\lambda_0 n_c \sin \phi}{n_s^2 - n_c^2 \sin^2 \phi}.$$

La primera línea de la rejilla corresponde a q_0 . La condición de coincidencia de fases se cumple para todas las partes de las elipses confocales. De este modo, podemos elegir qué parte de las elipses usamos para diseñar un acoplador de rejilla puesto que cada parte de la elipse acoplará la luz bajo el mismo ángulo Φ . Normalmente se toma la parte derecha de las elipses confocales como se muestra en la Fig. 14a, de manera que el vector de propagación $\vec{\beta}$ de la entrada de

35 guía de ondas es paralelo al vector de onda proyectado $\vec{k}_z = (2\pi/\lambda)n_c \sin \phi \vec{e}_z$ de la luz difractada (ángulo de guía de ondas $\sigma = 0^\circ$). Aunque esta parece ser la opción más lógica, este diseño introducirá la mayor reflexión de vuelta en la guía de ondas dado que la reflexión de las líneas de rejilla se reenfocherà a los segundos puntos focales $f_{2,q}$ y se acoplará de vuelta a la entrada de guía de ondas. Esto se resuelve utilizando otra parte de las elipses confocales como acoplador de rejilla y girando la guía de ondas en un ángulo σ de, por ejemplo, 45°, véase la Fig. 14b. En este diseño, los puntos focales y la rejilla no están en línea, por lo tanto, la reflexión de la rejilla se enfoca lejos de la entrada de guía de ondas

40 hacia una zona de franja, eliminando así por completo la reflexión de vuelta. En la Fig. 14c se ilustra el ángulo σ para el

ángulo de la guía de ondas de reflexión óptima y el ángulo de reflexión de segundo orden y en la FIG. 14d se ilustra el diseño de la entrada de guía de ondas.

Para obtener el número adecuado de la primera línea de rejilla q_0 , calculamos el ángulo del agujero de apertura en el plano ε de la entrada de guía de ondas utilizando una herramienta de propagación en modo 3D. Este ángulo determinará la longitud de enfoque de la franja r_0 y así q_0 de manera que la anchura del haz difractado coincida con la anchura del modo de fibra gaussiana. Se puede demostrar que esta longitud de enfoque no influye en el rendimiento del acoplador de rejilla y se puede elegir libremente. Sin embargo, en el diseño del acoplador de rejilla sin reflexión, cuanto mayor es la longitud de enfoque, mayor es la distancia desde la entrada de guía de ondas hasta el punto focal más cercano f_{2,q_0} en el cual se reenfoca la luz reflejada, minimizando así la reflexión acoplada de vuelta a la entrada de guía de ondas. Por otro lado, una mayor longitud de enfoque está acompañada por una apertura de guía de ondas más amplia y, por lo tanto, una mayor posibilidad de recuperar la luz reflejada de vuelta en la entrada de guía de ondas. Dependiendo de la geometría exacta de la entrada de guía de ondas, se debe elegir una anchura de guía de ondas adecuada. Existe un ángulo de guía de ondas σ de la entrada de guía de ondas para el cual el ángulo entre la luz incidente y la luz reflejada

$$\sigma = \cos^{-1} \left(\frac{n_c \sin \phi}{n_s} \right)$$

es máximo. Este ángulo de guía de ondas de reflexión óptima se deriva maximizando el ángulo de reflexión $\theta_0(\delta_0)$ dado por

$$\theta_0 = \beta - \delta_0 = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{n_c \sin \phi}{n_s \sin \delta_0} - \cot \delta_0 \right) - \delta_0$$

La Fig. 15a muestra q_0 en función de δ_0 para un ángulo de fibra Φ de 15° , longitud de onda $\lambda_0 = 1,55 \mu\text{m}$, revestimiento de SiO_2 ($n_c = 1,45$) y $n_s = 2,852$ correspondiente al índice efectivo del modo de franja TE que se propaga en una franja de SOI con un núcleo de Si de 220 nm de espesor rodeado de SiO_2 . El ángulo óptimo de la entrada de guía de ondas $\sigma = \delta_{0,\text{máx}}$ para estos parámetros es $82,4^\circ$ y $68,9^\circ$ para un ángulo de fibra Φ de 15° y 45° respectivamente. En la Fig. 15b, el ángulo de la guía de ondas de reflexión óptima y el ángulo de reflexión correspondiente θ_0 se representan en función del ángulo de inclinación de la fibra Φ . Podemos concluir que una mayor inclinación de la fibra da como resultado un mayor ángulo de reflexión θ_0 y, por lo tanto, en consecuencia, una menor reflexión de vuelta. Una inclinación de fibra más grande también reducirá la reflexión de vuelta de segundo orden (caso $\sigma=0^\circ$) de la rejilla. Sin embargo, por razones prácticas, normalmente se elige un ángulo de inclinación Φ entre 5° y 20° .

El hecho de tratar con reflexiones ultrabajas significa que incluso la reflexión más pequeña tendrá una contribución significativa en la reflexión global. Reducir todas las fuentes de reflexión posibles es, por lo tanto, muy crucial. Una fuente importante de reflexiones parásitas son las discontinuidades previstas, como puede ser en la salida de la entrada de guía de ondas. Estos pueden minimizarse inclinando las zanjas como se muestra en la Fig. 14d.

La luz reflejada y reenfocada de la rejilla puede reflejarse de vuelta sobre la rejilla y, por lo tanto, de vuelta dentro de la guía de ondas. Por lo tanto, también debemos asegurarnos de que la luz reflejada no incida normalmente en ninguna característica.

Otra mejora es diferenciar entre el índice de refracción efectivo de la rejilla n_g y el índice de refracción efectivo de la zona de la franja n_s (véase la Fig. 13). La condición de coincidencia de fases para la primera línea de la rejilla correspondiente a q_0 se mantendrá igual. En esta primera línea de la rejilla, la luz pasará de una franja con índice de refracción n_s a una zona de la rejilla con índice de refracción n_g y así se refractará en esta interfaz con un ángulo

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{n_s \sin \theta_0}{n_g} \right)$$

según la ley de Snell. El ángulo entre el haz entrante y el haz refractado es así $\alpha = \pi + \theta_0 - \theta_1$. Resolviendo la condición de fase numéricamente

$$q\lambda_0 = r_0 n_s + d n_g - r \cos \delta n_c \sin \phi$$

junto con el sistema de ecuaciones geométricas $d^2 = r_0^2 + r^2 - 2r_0 r \cos(\delta_0 - \delta)$ y $r^2 = r_0^2 + d^2 - 2r_0 d \cos \alpha$ por cada punto de refracción (r_0, δ_0) a (r, δ) dará como resultado las líneas de rejilla posteriores para $q \geq q_0 + 1$.

Los acopladores de rejilla, diseñados como se ha descrito anteriormente, se simularon utilizando el software FDTD 3D completamente vectorial. Para calcular los espectros de reflexión, se lanzó un pulso con un perfil de tiempo gaussiano en la guía de ondas de acceso unimodo y se midió el flujo reflejado en esa misma guía de ondas. La eficacia de acoplamiento fue simulada por la potencia normalizada en la guía de ondas unimodo después de poner en marcha un modo gaussiano bajo los ángulos y polarización correctos. Se descubrió que el ángulo de la guía de ondas de reflexión óptima tiene la reflexión de vuelta más baja, pero también tiene la eficacia de acoplamiento más baja. Esto se debe a que este ángulo de la guía de ondas corresponde al ángulo para la reflexión de Bragg de segundo orden (caso

5 $\sigma = \cos^{-1}\left(\frac{n_c \sin \phi}{n_s}\right)$ cuando $\vec{k} \cdot \vec{k}_z = 0$ (véase la Fig. 14c). Las Figuras 16a y 16b muestran los espectros de la reflexión de vuelta en la entrada de guía de ondas del acoplador de rejilla propuesto para diferentes ángulos de guía de ondas σ . Para las rejillas grabadas a poca profundidad (grabado de 70 nm en un núcleo de Si de 220 nm) y para el ángulo de inclinación de la fibra $\Phi=10^\circ$, la reflexión de vuelta de segundo orden presente en las longitudes de onda más altas disminuye alrededor de 5 dB a 10 dB para ángulos de guía de ondas de hasta 45° sin penalización por eficacia de acoplamiento (la eficacia típica del acoplador de rejilla es de alrededor del 30%). Vemos que principalmente se reduce la reflexión de segundo orden (caso $\sigma=0^\circ$) presente en las longitudes de onda más altas. Esta reflexión de segundo orden se puede reducir fácilmente aumentando el ángulo de inclinación de la fibra a 15° e incluso más utilizando el novedoso diseño del acoplador de rejilla. La reducción de la reflexión es la más pronunciada en el caso de acopladores de rejilla completamente grabados (núcleo de Si de 220 nm) que tienen una eficacia típica de alrededor del 10%. La reflexión de vuelta disminuye de -7 dB a -28 dB para $\sigma = 45^\circ$.

Los párrafos anteriores ilustran que la reflexión en los acopladores de rejilla podría reducirse hasta -40 dB, logrando así el mismo rendimiento de reflexión de vuelta de un conector de fibra óptica típico, sin introducir una penalización por eficacia de acoplamiento. Además, se demostró que este procedimiento puede usarse para reducir la reflexión de acopladores de rejilla altamente reflectantes (-7 dB) a reflexiones útiles de -28 dB. Los dispositivos según realizaciones de la presente invención se pueden aplicar en una pluralidad de aplicaciones, incluidos diseños y circuitos basados en interferómetro que utilizan láseres y amplificadores integrados.

A modo de ilustración, a continuación se analizan datos experimentales que ilustran ventajas de los sistemas y procedimientos según realizaciones de la presente invención, siendo las realizaciones no limitadas a los mismos.

En un diseño usado en el presente ejemplo, se usa un acoplador de rejilla de enfoque en el que las coordenadas de las zanjas se definen por

$$r(q, \alpha) = q\lambda_0 / (n_g - n_c \sin \phi \cos \alpha)$$

30 donde $r(q, \alpha)$ es el radio de cada posición de las rejillas, α es los acimuts, $q \in \mathbb{N}$ es el índice de las rejillas, λ_0 es la longitud de onda de la luz en el vacío, Φ es el ángulo entre la fibra y la dirección normal del chip, y n_g y n_c son los índices efectivos de la zona de la rejilla y el material de revestimiento superior, respectivamente.

Estas curvas resultan ser una matriz de elipses con la misma posición de los primeros puntos de enfoque $f_{1,q}$, y el mismo valor de excentricidad $e = n_c \sin(\Phi) / n_g$. La entrada de guía de ondas tiene su extremo ubicado en el primer punto de enfoque.

En los acopladores de rejilla estándar y de enfoque, se pueden introducir dos tipos de reflexiones: la reflexión de segundo orden y la reflexión de Fresnel. El ángulo de inclinación de la fibra Φ a menudo se establece en 10° o 15° para asegurarse de que la reflexión de segundo orden no esté excitada. Sin embargo, las reflexiones de Fresnel en el límite entre la franja y las zonas de rejilla todavía se pueden enviar de vuelta a la entrada de guía de ondas. Para evitar estas reflexiones, las realizaciones de la presente invención aprovechan zonas de rejilla con α diferente de 0° . Esto se hace inclinando la entrada de guía de ondas con un cierto ángulo, como se puede ver en la FIG. 17(b). Para la luz proveniente de la entrada de guía de ondas ubicada en el primer punto de enfoque de las elipses, la reflexión de Fresnel de la primera elipse se dirigirá al segundo punto de enfoque en lugar del primero. Con la entrada de guía de ondas inclinada, se enviarán menos reflexiones a la guía de ondas. El ángulo de rotación óptimo de la entrada de guía de ondas puede determinarse mediante simulación y se determinó que para un intervalo de longitud de onda cercano a 1550 nm, la reflexión promedio se puede reducir de 10 a 15 dB con $\alpha = \pi/4$.

Para los valores mencionados anteriormente, se supuso que los valores de índice efectivo de la zona de franja n_s y las zonas de rejilla n_g son los mismos, lo que sin embargo no es cierto. Los errores causados por la estimación del índice efectivo pueden tener un gran impacto en las rejillas con gran α . Considerando la diferencia del índice efectivo, una ecuación más general que describe las zanjas utilizables se escribe como

$$r(q, \alpha) = \frac{(q - q_0) \cdot \lambda_0}{n_g - n_c \sin \phi \cos \alpha} + p(q_0, \alpha),$$

$$\text{cumple } p(q_0, \alpha) = \frac{\kappa q_0 \lambda_0}{n_s - n_c \sin \phi \cos \alpha},$$

donde $q_0 \in \mathbb{N}$ es el índice de la primera línea, $\kappa \in \mathbb{R}$ es un factor para definir la distancia de la primera línea en la rejilla. Las desviaciones del radio del diseño anterior se muestran en la Fig. 18, en la que κ se eligió como

$$5 \quad \frac{n_s - n_c \sin \phi}{n_g - n_c \sin \phi}$$

de modo que $r(q_0, 0)$ es el mismo que el diseño anterior. Se puede ver que las desviaciones máximas no son muy grandes para valores pequeños de q . Como resultado, la antigua fórmula se puede usar en la mayoría de los casos para los diseños de acopladores de rejilla. En la ecuación anterior para $r(q, \alpha)$, las difracciones en los límites entre la franja y las zonas de rejilla no se consideran, y los índices efectivos de las zonas de rejilla se establecen en el mismo valor. Es adecuado para acopladores de rejilla con un ángulo de fibra pequeño Φ . Para el diseño con $\Phi=10^\circ$, $\lambda_0=1550$ nm y $n_c = 1$, la desviación máxima es solo el 2% de la longitud de onda y, por lo tanto, puede omitirse. Si no se pueden omitir las difracciones y las variaciones efectivas del índice en la zona de la rejilla, se utilizará un procedimiento numérico.

15 Los acopladores de rejilla curvos (que se muestran en la FIG. 20) con diferentes α se fabrican usando litografía UV de 192 nm profundidad. Los diseños se hicieron para acoplar la luz con una longitud de onda de 1550 nm. El revestimiento encima de las rejillas es aire. La anchura de la apertura de entrada de guía de ondas se estableció en 0,9 μm . Para tener la mejor coincidencia de modo entre la rejilla y una fibra unimodo, se diseñaron y se midieron una serie de acopladores de rejilla ($\alpha=0^\circ$) con un barrido de q_0 . Las eficacias de transmisión máximas y las longitudes de onda correspondientes se trazan en la FIG. 19. Se encuentra que la mejor q_0 es 26.

20 La transmisión de los acopladores de rejilla en la FIG. 20(a) se midió en el intervalo de longitud de onda entre 1490 nm y 1570 nm. Debido a problemas de fabricación, las longitudes de onda para las transmisiones máximas se desplazan a valores más bajos, que pueden verse más claramente en la FIG. 21. Las barras horizontales sólidas y punteadas en la FIG. 21 representan la máxima eficacia de transmisión (-4,6 dB) y la longitud de onda correspondiente de un acoplador de rejilla estándar (1517 nm). Para acopladores de rejilla con α cerca de 180° , los valores de ancho de banda de transmisión de 1 dB son alrededor de 43 nm. Para α cerca de 90° , la banda de transmisión se vuelve extraña, y esto se debe a las estimaciones incorrectas del índice efectivo de la rejilla (n_g) y luego del ángulo de la fibra (Φ). El ancho de banda mínimo de 1 dB es de 28 nm para $\alpha = 60^\circ$.

Las reflexiones se midieron mediante una reflectometría simplificada óptica en el dominio de la frecuencia (OFDR). El montaje de medida se muestra esquemáticamente en la FIG. 22.

30 Se utiliza un circulador para recuperar las reflexiones de la cara del extremo de la fibra y las reflexiones del chip al detector. Al barrer la longitud de onda del láser sintonizable con un incremento de longitud de onda de 20 pm, se mide el espectro de reflexión. El posprocesamiento se realiza en un ordenador, donde la distribución espacial de la reflexión se calcula a partir de la autocorrelación $R(z)$ de las señales detectadas. Se realizaron tres etapas antes de calcular $R(z)$:

1. mapear los espectros de reflexión del dominio de longitud de onda en el dominio de la frecuencia, utilizando la función de interpolación lineal.
- 35 2. multiplicar una ventana gaussiana a las reflexiones en el dominio de la frecuencia, para suprimir las pérdidas numéricas.
3. rellenar con ceros, a fin de obtener una malla de frecuencias más densa en la función de autocorrelación, lo cual es bueno para estimar el ancho de banda de 3 dB de los picos.

40 Después de estas etapas, se obtuvo una densidad espectral de potencia $P(f)$ para una matriz de frecuencias f . A continuación, se derivó $R(z)$ calculando la transformada inversa de Fourier de $P(f)$. El índice de grupo utilizado en el cálculo (3,75) fue el índice de grupo promedio a lo largo del cono. Se encuentra que un pico en la respuesta espacial representa las reflexiones del acoplador de rejilla. Los valores de reflectancia corresponden a los máximos de

autocorrelación y se calculan por integración sobre el ancho de banda de 3 dB alrededor de los máximos, y los resultados se muestran en la FIG. 23. Se encuentra que las reflexiones promedio para acopladores de rejilla con α entre 45° y 135° se suprimen en más de 20 dB. El α óptimo no es 90° . Teniendo en cuenta las penalizaciones de transmisión, la α de los acopladores de rejilla sin reflexión debe estar dentro del intervalo entre 45° y 60° .

- 5 El ejemplo anterior ilustra las posibilidades de las realizaciones de la presente invención para optimizar la pérdida de retorno en acopladores de rejilla curvos en silicio sobre aislantes, más particularmente se muestra una reducción de la reflexión en hasta 30 dB medida con reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo fotónico integrado (1), el dispositivo fotónico integrado (1) que comprende:

- una guía de ondas (4) incrustada en un sustrato fotónico, la guía de ondas (4) que tiene una superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) y la guía de ondas (4) que está conectada ópticamente a una rejilla bidimensional (2),

5 - una rejilla bidimensional (2) que tiene una pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos (3), dicha rejilla bidimensional (2) que está adaptada para difractar la radiación recibida desde la guía de ondas (4) fuera de la superficie en la que dicha rejilla bidimensional (2) está incrustada,

10 en el que los elementos de dispersión alargados curvos (3) están orientados con respecto a la guía de ondas de manera que, para los puntos de los elementos de dispersión que pueden irradiarse mediante radiaciones provenientes de la guía de ondas, las líneas normales (B) al menos al elemento de dispersión alargado curvo (3) más cercano a la superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) no interseca con dicha superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) de dicha guía de ondas en al menos el 50% de los puntos iluminados, y en el que al menos uno de la pluralidad de elementos de dispersión alargados (3) forma al menos una parte de una elipse que tiene un primer punto de enfoque colocado sustancialmente en dicha superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) y que tiene un eje principal que forma un ángulo diferente de 0 radianes con un eje longitudinal (A) de la guía de ondas, en el que el ángulo entre el eje principal y el eje longitudinal (A) de la guía de ondas está entre 10° y 170°.

2. Un dispositivo fotónico integrado (1) según la reivindicación 1, en el que dicho ángulo es mayor que la mitad de la suma del ángulo de divergencia de la luz que emana de dicha guía de ondas y la relación del diámetro máximo de la superficie extrema de la guía de ondas sobre la distancia focal entre la superficie de rejilla y la superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S).

3. Un dispositivo fotónico integrado (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la rejilla (2) es una rejilla elíptica.

4. Un dispositivo fotónico integrado (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha rejilla (2) está adaptada para difractar la radiación recibida desde la guía de ondas (4) fuera del circuito fotónico integrado y hacia una dirección que forma un ángulo mayor que 0° con una superficie normal al circuito fotónico integrado.

5. Un dispositivo fotónico integrado (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, el dispositivo fotónico integrado (1) además comprende un láser integrado conectado ópticamente a dicha guía de ondas (4).

6. Un dispositivo fotónico integrado (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho sustrato fotónico es un sustrato de silicio sobre aislante.

7. Un dispositivo fotónico integrado (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha pluralidad de elementos de dispersión alargados (3) comprenden líneas grabadas en un sustrato fotónico.

8. Un dispositivo fotónico integrado (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha pluralidad de elementos de dispersión alargados (3) comprenden tiras de material encima de un sustrato fotónico.

9. Un sistema óptico para guiar la radiación, el sistema óptico que comprende un dispositivo fotónico integrado según cualquiera de las reivindicaciones anteriores y una fibra óptica en comunicación óptica con el dispositivo fotónico integrado para recoger la radiación dirigida desde la guía de ondas (4) mediante la rejilla 2D.

10. Un procedimiento para acoplar la radiación de una guía de ondas (4) incrustada en un dispositivo fotónico integrado de la reivindicación 1 fuera de dicho dispositivo, el procedimiento que comprende dirigir la radiación recibida desde dicha guía de ondas a través de una superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) hacia una rejilla bidimensional (2), la rejilla bidimensional que está adaptada para difractar la radiación recibida desde la guía de ondas (4) hacia una dirección fuera de la superficie de dicho dispositivo fotónico integrado en el que está incrustada la rejilla bidimensional, y la rejilla bidimensional (2) que comprende una pluralidad de elementos de dispersión alargados curvos (3) que están orientados con respecto a la guía de ondas de manera que, para los puntos de los elementos de dispersión que pueden irradiarse mediante radiaciones provenientes de la guía de ondas, las líneas normales (B) al elemento de dispersión alargado curvo (3) más cercano a la superficie de salida de radiación de la guía de ondas no interseca con dicha superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) de dicha guía de ondas en al menos el 50% de los puntos iluminados y el acoplamiento de dicha radiación usando dicha rejilla bidimensional (2) fuera de la superficie de dicho dispositivo fotónico integrado en el que está incrustada la rejilla bidimensional caracterizada por que dicho direccionamiento dirige la radiación hacia la rejilla bidimensional en la que al menos uno de la pluralidad de elementos de dispersión alargados (3) forma al menos una parte de una elipse que tiene un primer punto de enfoque colocado

sustancialmente colocado en dicha superficie de salida de radiación de la guía de ondas (S) y que tiene un eje principal que forma un ángulo diferente de 0 radianes con un eje longitudinal (A) de la guía de ondas, en el que el ángulo entre el eje principal y el eje longitudinal (A) de la guía de ondas está entre 10° y 170° .

- 5 11. Uso de un dispositivo fotónico integrado según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 para acoplar en la entrada o acoplar en la salida la radiación desde o hacia un dispositivo fotónico integrado.

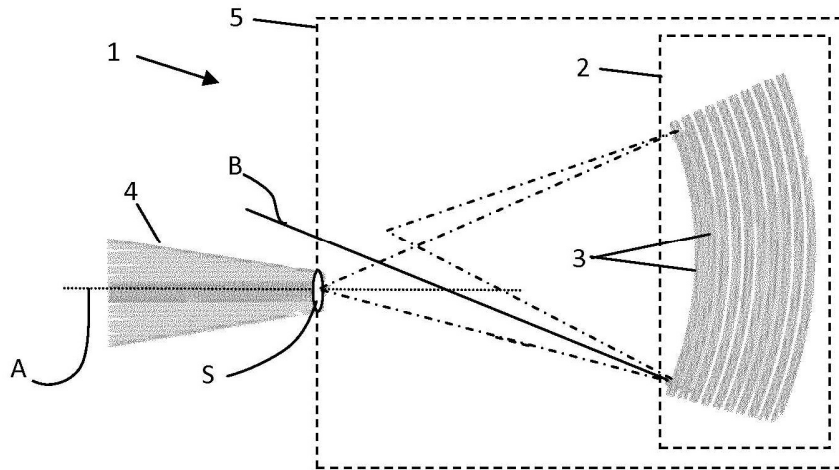


FIG. 1

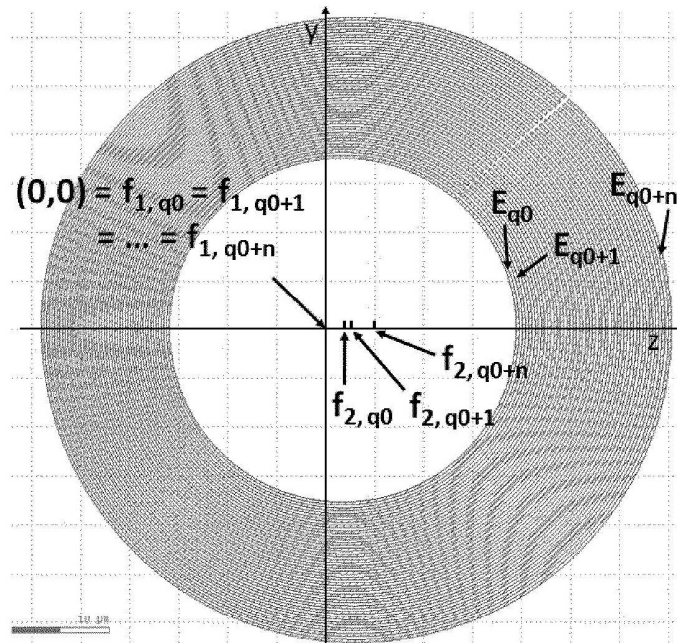


FIG. 2

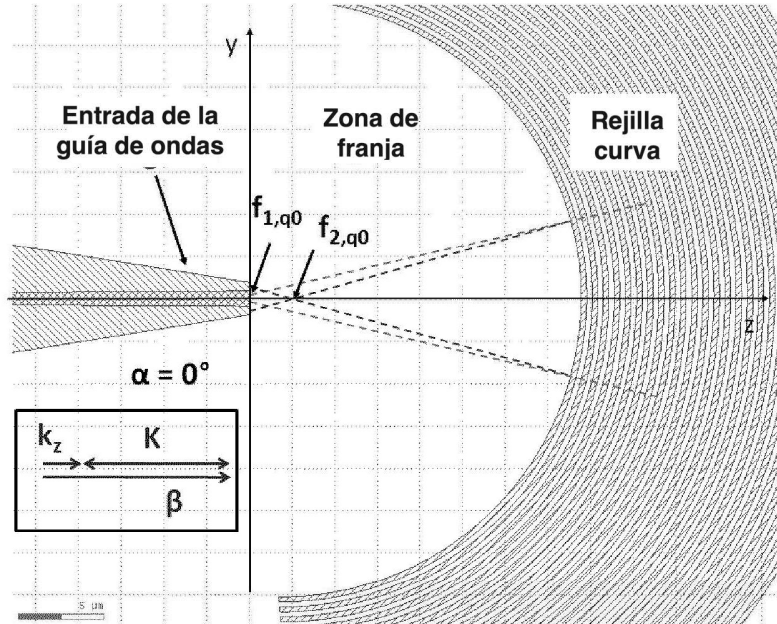


FIG. 3

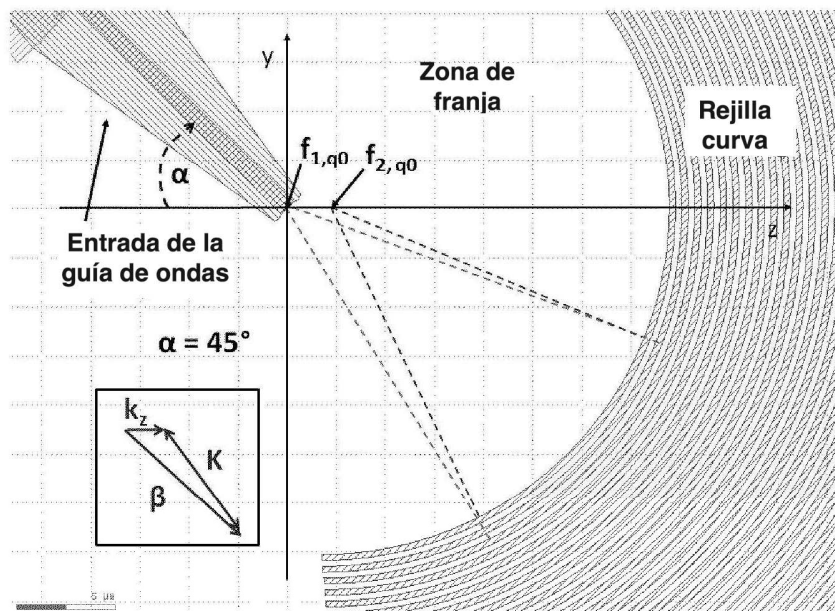


FIG. 4

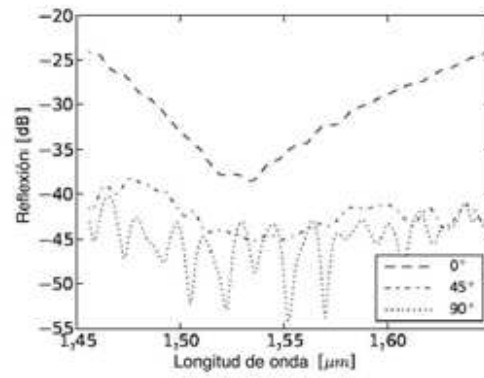


FIG. 5

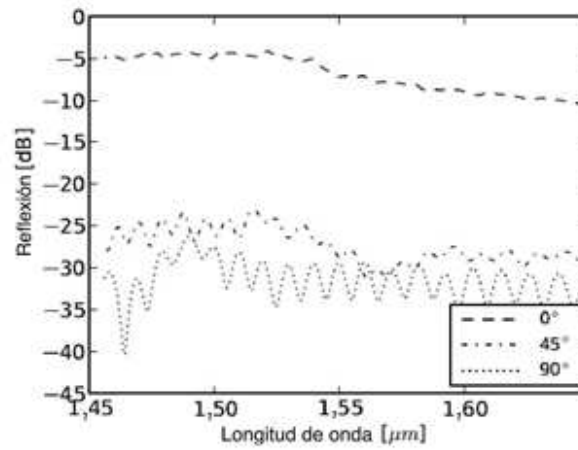


FIG. 6

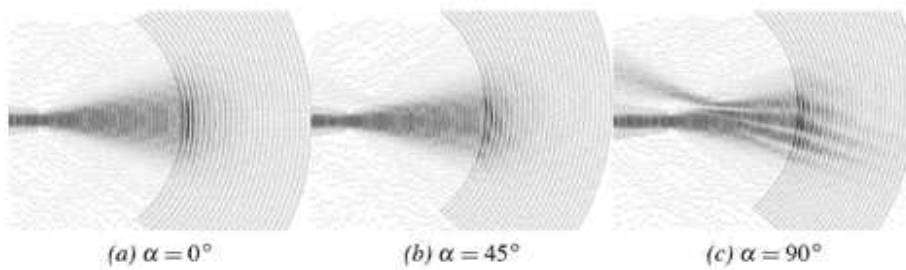


FIG. 7

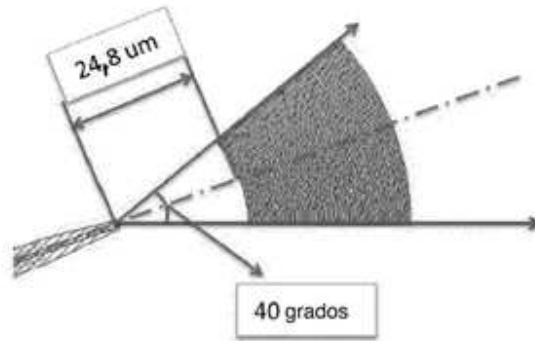


FIG. 8

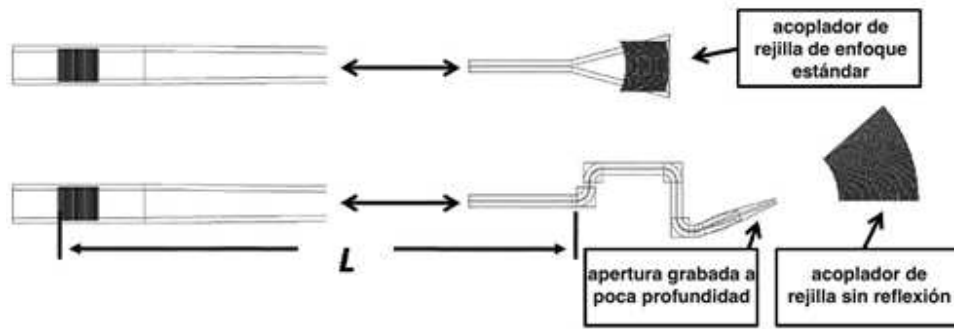


FIG. 9

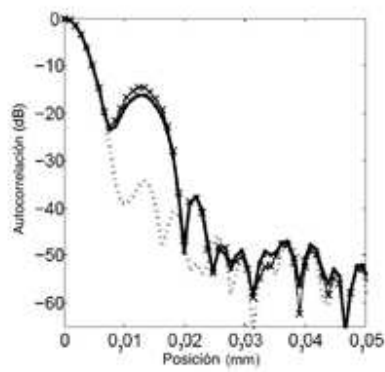


FIG. 10

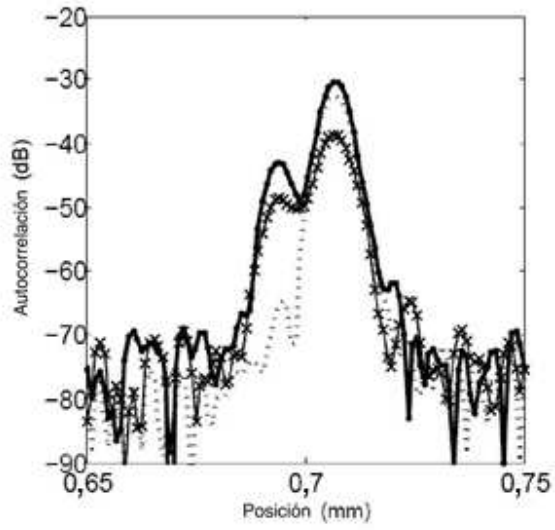


FIG. 11

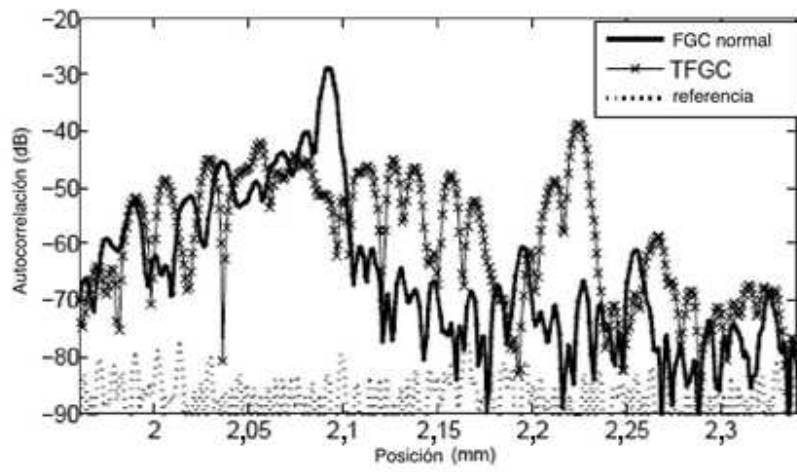


FIG. 12

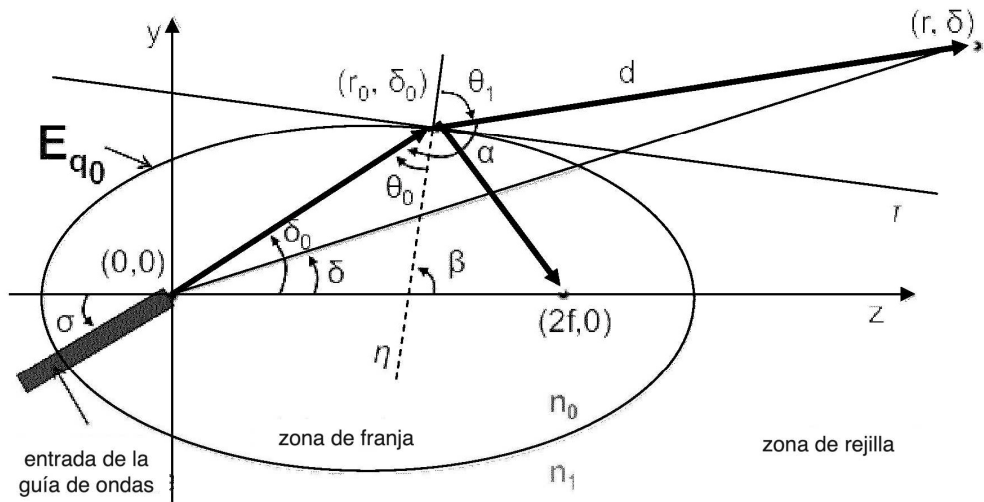
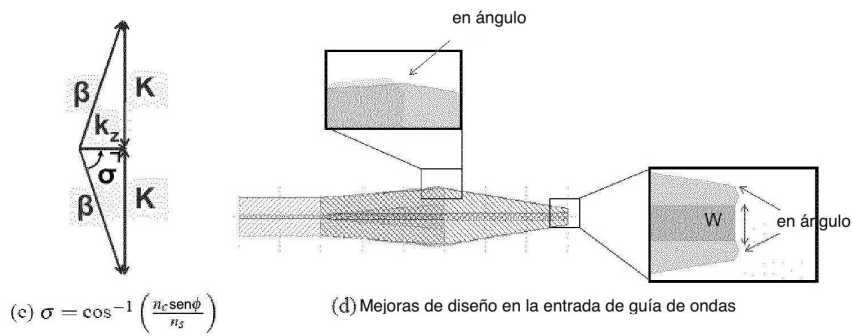
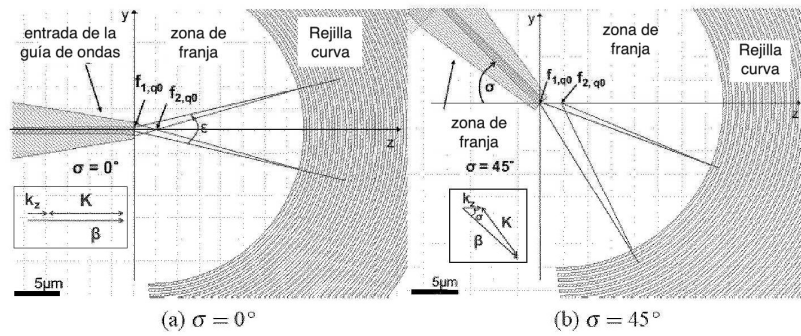


FIG. 13



(c) $\sigma = \cos^{-1} \left(\frac{n_c \text{sen} \phi}{n_s} \right)$

FIG. 14

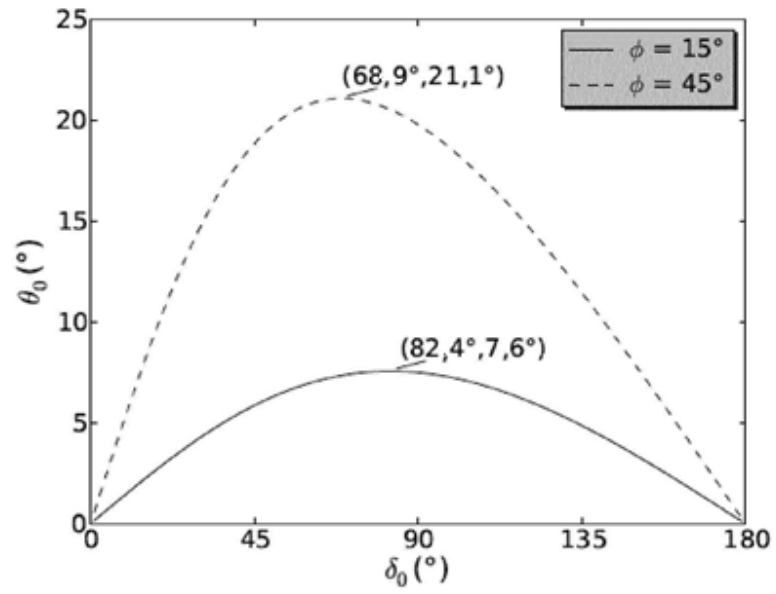


FIG. 15a

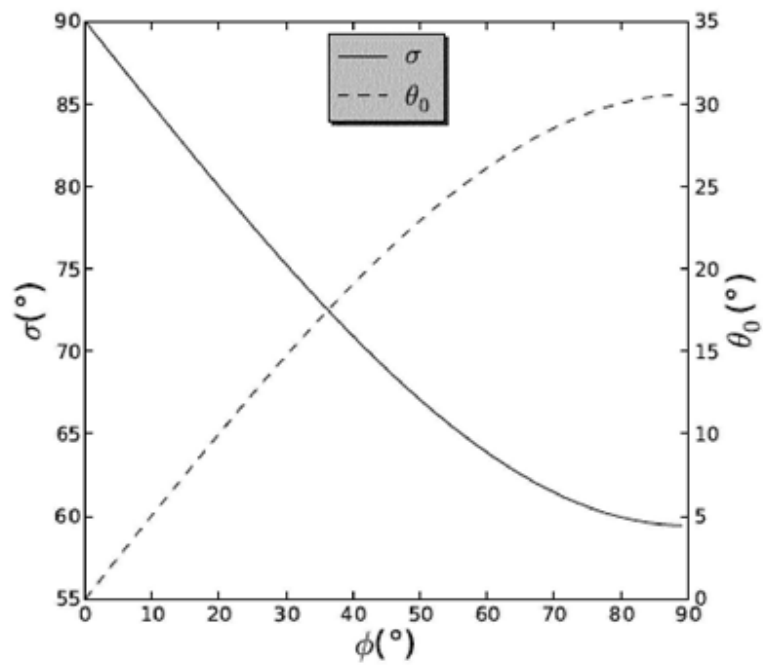


FIG. 15b

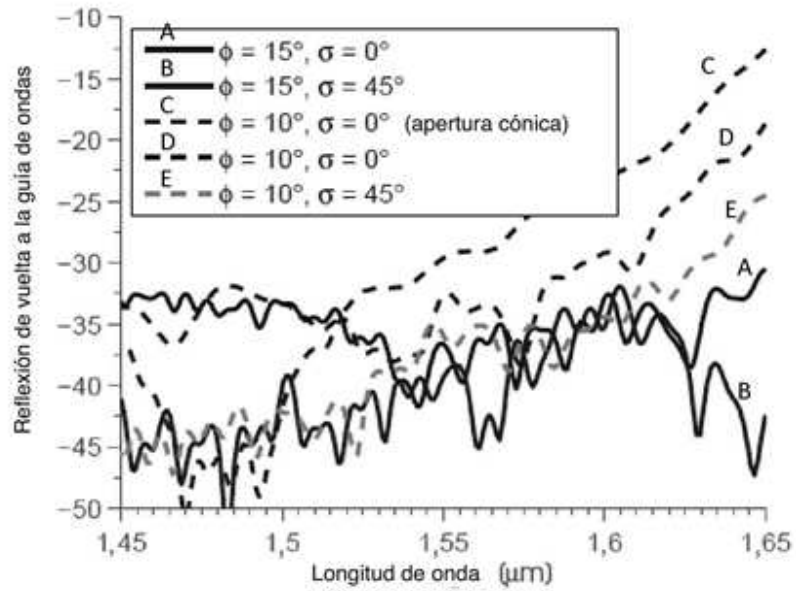


FIG. 16a

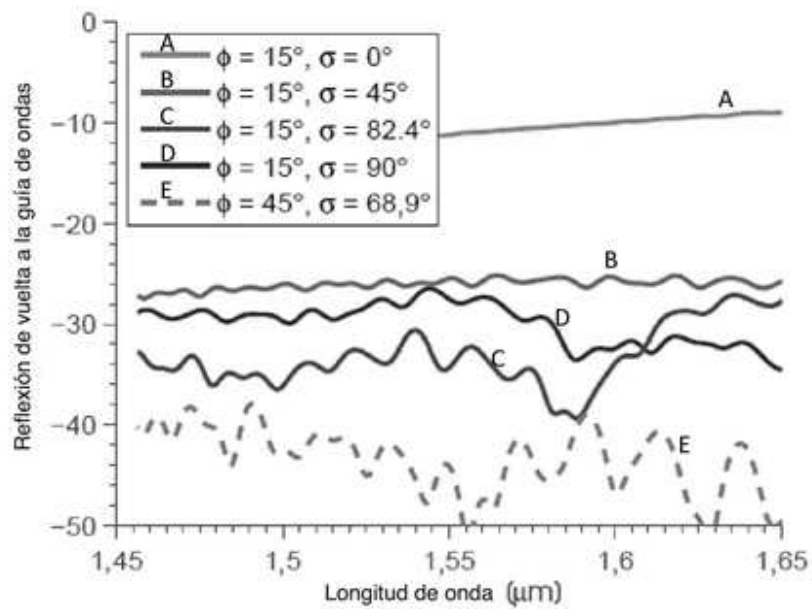


FIG. 16b

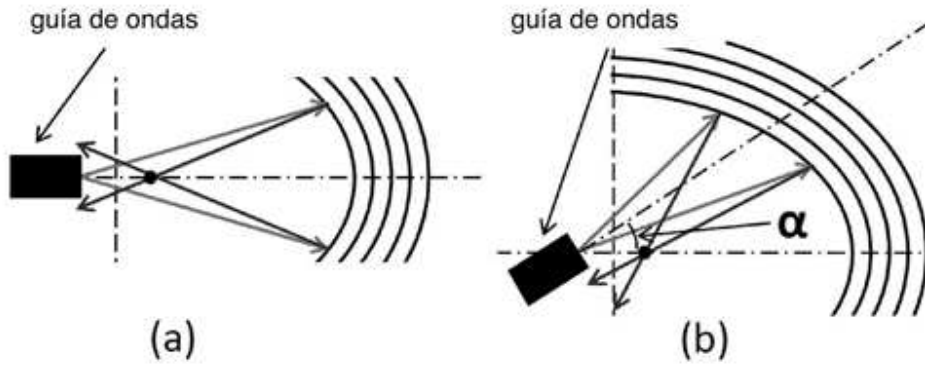


FIG. 17

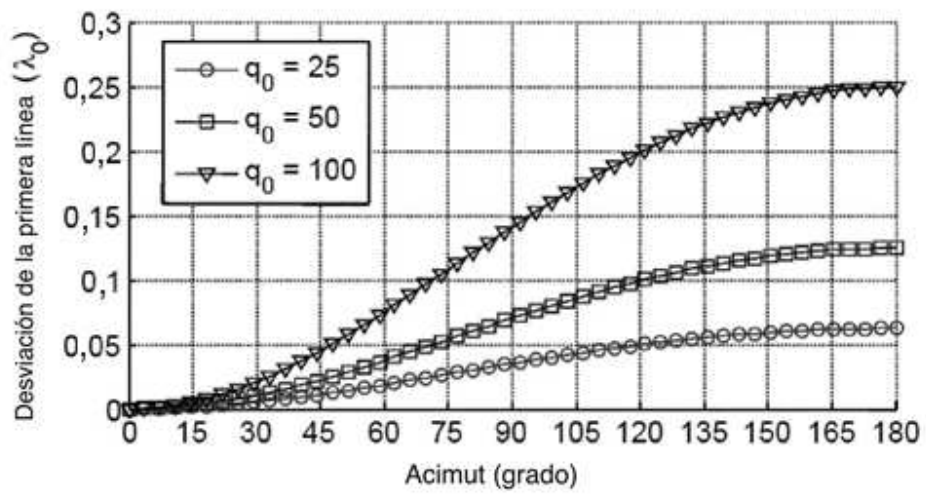


FIG. 18

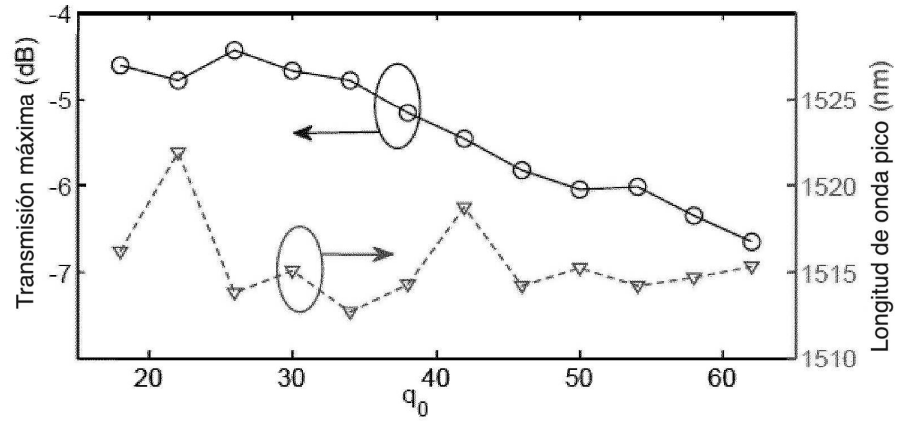


FIG. 19

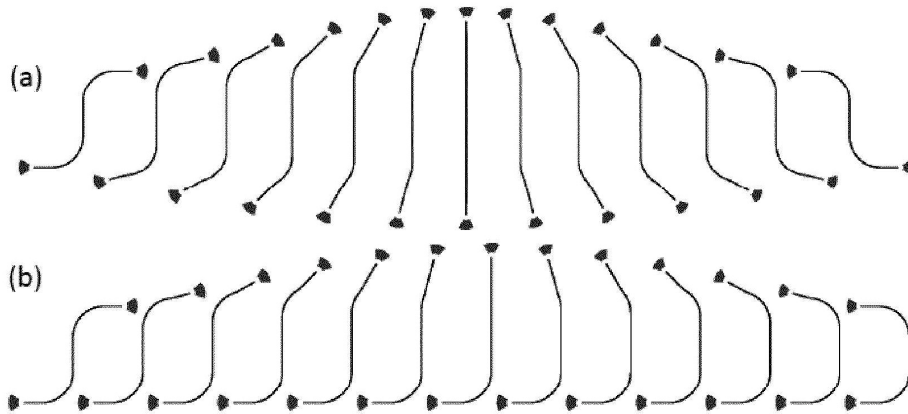


FIG. 20

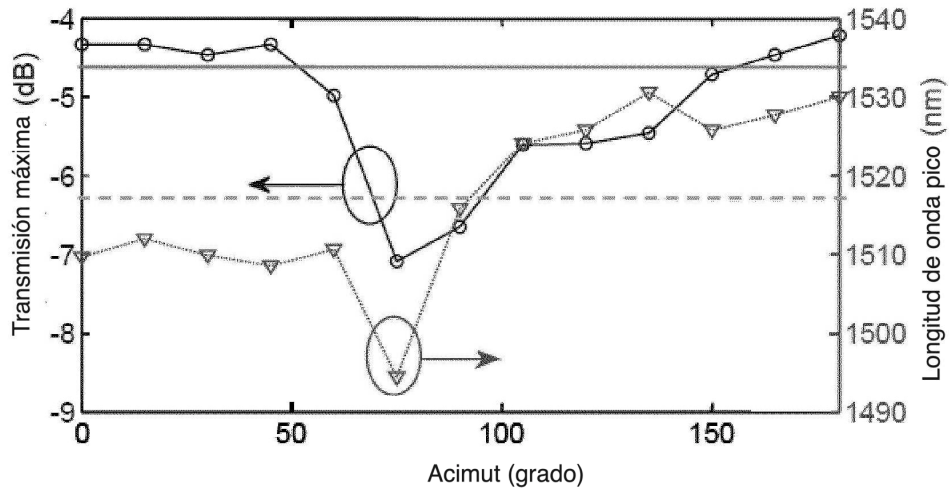


FIG. 21

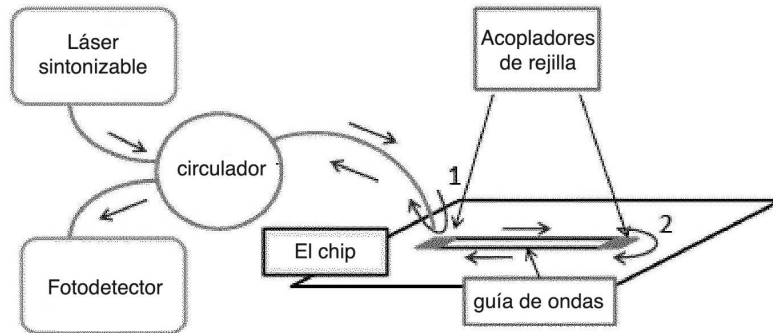


FIG. 22

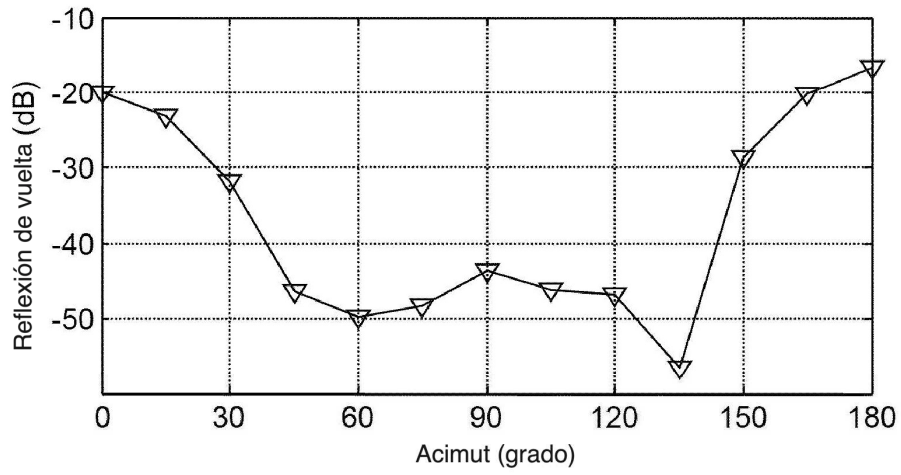


FIG. 23