

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 465 619**

51 Int. Cl.:

**G01N 21/45** (2006.01)

**G01N 21/77** (2006.01)

**G02B 6/12** (2006.01)

**G02B 6/124** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.07.2007 E 07381053 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.02.2014 EP 2017602**

54 Título: **Interferómetro y sensor basados en una guía de onda óptica bimodal y procedimiento de detección**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**06.06.2014**

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (100.0%)  
Serrano, 117  
28006 Madrid, ES**

72 Inventor/es:

**ZINOVIEV, KIRILL;  
LECHUGA GÓMEZ, LAURA MARÍA y  
DOMÍNGUEZ HORNA, CARLOS**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 465 619 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

Interferómetro y sensor basados en una guía de onda óptica bimodal y procedimiento de detección

**Campo de la invención**

5 La presente invención se refiere a interferómetros y sensores basados en guías de ondas óptica, y más concretamente, a interferómetros y sensores basados en guías de ondas óptica bimodales.

**Estado de la técnica**

10 La detección de una molécula, ej.: proteína, glucosa o la unión entre moléculas es un tema conocido. La cantidad de reactivo o la concentración de moléculas presente en una solución puede ser baja y son necesarios dispositivos altamente sensibles para la detección de las moléculas. La detección puede dirigirse utilizando varios procedimientos y técnicas. Existen diversos dispositivos nanomecánicos y ópticos, tales como los interferómetros Mach-Zhender, la Resonancia de Plasmen Superficial, los interferómetros Young, los interferómetros Fabry-Perot y los interferómetros tipo slab. Los interferómetros Mach-Zhender y Young son dispositivos compactos basados en guías de onda óptica, conocidos desde hace mucho tiempo y que se han estudiado en profundidad. Actualmente éstas técnicas se cuentan entre las más precisas en el campo de la detección biomolecular, porque la simplicidad de las estructuras planas robustas confiere una ventaja en procedimientos de inmovilización relativamente simples. Los procedimientos y protocolos desarrollados permiten la unión de moléculas sin etiqueta. Esto hace que los experimentos sean menos laboriosos y más repetibles, pues etiquetar podía inducir a error, al interferir en los resultados efectivos. Los interferómetros suelen tener dos brazos, cuando el interferómetro actúa como un dispositivo de detección y uno de ellos posee una ventana de detección, mientras que el otro es una referencia. El reactivo, que fluye a través de la ventana de detección, interactúa con las moléculas previamente inmovilizadas por las guías de onda situadas en la zona. Esto modifica el índice de refracción de la capa de revestimiento de la guía de onda y por consiguiente la velocidad de propagación de la luz a lo largo de este guía de onda. Como consecuencia, se produce un cambio de las fases de las ondas de luz que se propagan por ambos brazos. Al mezclar éstas ondas se obtienen resultados distintos, dependiendo del tipo de interferómetro: un patrón de interferencia en el caso del interferómetro Young y una variación en la señal del canal de salida en el caso del interferómetro Mach-Zhender.

15 Sin embargo, los interferómetros de dos brazos tienen el inconveniente de tener dificultades en dividir la luz adecuadamente. Si hubiera defectos de fabricación, la simetría crítica de la intersección Y hace que sea más probable que el interferómetro sea proclive a una profundidad de modulación reducida y pérdidas de sensibilidad.

30 Además, una sensibilidad alta sólo se obtiene en guías de onda relativamente delgadas. La sensibilidad viene definida por la profundidad de penetración del campo evanescente de la guía de onda en el analito, en combinación con la misma, es decir, en el analito que está en contacto con la guía de onda. La profundidad de penetración aumenta significativamente si disminuye el grosor de la guía de onda. Esto entraña complicaciones a la hora de acoplar la luz, debido al desajuste entre la distribución de intensidad en el modo de propagación de la guía de onda en guías de onda delgadas, y la distribución de intensidad de una fuente de luz convencional.

35 De hecho, el ajuste inicial de cambio de fases entre las ondas de luz interferentes en las dos ramas requiere esfuerzos tecnológicos y de ingeniería adicionales.

40 Los problemas mencionados anteriormente pueden ser en parte resueltos mediante el uso de interferómetros de guía de onda bimodales. Un ejemplo de un dispositivo que opera gracias a la interferencia de dos modos de propagación se presentó en la solicitud de patente japonesa JP2004145246. Este dispositivo consiste en una guía de onda monomodo, seguida de otra bimodal, a su vez seguida de una tercera guía de onda monomodo.

45 El principio operativo de la estructura descrita en JP2004145246 se basa en la interferencia de dos modos de propagación en una guía de onda bimodal plana. La figura 5 muestra tal guía de onda. Aunque la estructura física es tridimensional, en lo tocante a sus propiedades la estructura es bidimensional: En dirección longitudinal (consta como eje X en la figura 5), que es dirección en la que se propaga la luz, la estructura posee un escalón o costilla 500 que determina un cambio de grosor a lo largo del eje longitudinal. En dirección transversal (consta como eje Y en la figura 5), las propiedades (ej. índice de refracción) de los materiales de la guía de ondas cambian. En dirección lateral (consta eje Z en la figura 5), la estructura de guía de onda es uniforme, ya que sus propiedades no cambian a lo largo de esta dirección lateral. La estructura es, por tanto, bidimensional (desde el punto de vista de la propagación posee una dimensión longitudinal y otra transversal).

50 Sin embargo, la dimensión del dispositivo de JP2004145246 no posibilita la fabricación de interferómetros largos y estrechos, capaces de detectar cambios mínimos en el índice de refracción de la capa de revestimiento.

Otro ejemplo de dispositivo que opera con la interferencia de modos de propagación fue presentado por G. Coppola et al. en "Temperature Optical Sensor Based on all Silicon Bimodal Waveguide", en el cual los modos laterales están implicados en la generación del patrón de interferencia. Este dispositivo puede elaborarse utilizando una fotolitografía convencional.

5 No obstante, el control preciso de la geometría del interferómetro en dirección lateral es muy necesario para implementar el dispositivo con precisión. Este control de la geometría lateral del dispositivo es muy difícil de conseguir usando tecnologías microelectrónicas convencionales.

10 De hecho, la arquitectura de los dispositivos en JP2004145246 y G. Coppola et al. implica una estructura de guía de onda secuencial, diseñada para excitar los modos y para leer la señal de interferencia. Esto produce limitaciones en la sensibilidad de los dispositivos y la versatilidad de los mismos.

El documento 49440328 A divulga una guía de onda bimodal que soporta un modo lateral, con sensibilidad limitada.

### Sumario de la invención

15 La presente invención se centra en estructuras de guía de onda bimodales en las que el retardo de fase relativo diferente entre los dos modos de propagación se acumula cuando está sujeto a un cambio estructural. La presente invención está relacionada con un interferómetro de guías de onda ópticas que comprende una guía de onda bimodal, en la que la dispersión de los modos de propagación es sensible al orden de los modos según la reivindicación 1.

20 Un aspecto de la invención se refiere a un interferómetro de guía de onda óptica plana que comprende un sustrato; una guía de onda bimodal, que comprende al menos una capa depositada sobre el sustrato, estando la guía de onda bimodal diseñada para soportar modos de propagación transversales de orden cero y primero, teniendo los modos de propagación transversales una dispersión diferente; una ventana de detección situada en una zona seleccionada de la parte superior de la guía de onda bimodal, siendo la ventana de detección diseñada para recibir un estímulo de entrada químico, biológico o físico, siendo este estímulo capaz de modificar el índice de refracción efectivo de la guía de onda bimodal. La guía de onda bimodal comprende, además, medios de confinamiento diseñados para confinar la luz en dirección lateral, estando la guía de onda bimodal diseñada, por tanto, para soportar un modo lateral.

El interferómetro preferiblemente comprende una fuente de radiación electromagnética configurada para guiar la luz en la guía de onda bimodal. Esta fuente es más preferiblemente un láser.

30 Cabe la opción de que la fuente esté integrada en la estructura del sustrato.

En una realización particular, el interferómetro comprende, además, medios de polarización.

35 Como opción, el interferómetro comprende, además, medios de enfoque. En una realización particular el medio de enfoque es una lente. En esta situación, el eje central de la lente está configurado para desalinearse en dirección transversal con respecto al eje de simetría longitudinal de la guía de onda bimodal, siendo, de este modo, los modos de propagación primero y segundo excitados dentro de la guía de onda bimodal, cuando la luz de la fuente se enfoca directamente a través de dicha lente hacia la guía de onda bimodal.

40 En una realización particular, el interferómetro comprende, además, una guía de onda de entrada conectada a un extremo de la guía de onda bimodal, siendo ésta guía de onda de entrada diseñada para soportar un monomodo en dirección transversal y lateral; y una guía de onda de salida conectada al otro extremo de la guía de onda bimodal, estando ésta guía de onda de salida diseñada para soportar un monomodo en dirección transversal y lateral. El grosor de cada una de las guías de onda de entrada y de salida es menor que el de la guía de onda bimodal, debido a la geometría asimétrica de la estructura en la intersección de la guía de onda de entrada y la guía de onda bimodal, el monomodo se divide en el primer y segundo modo de propagación transversales. Como opción, el interferómetro comprende, además, medios para acoplar radiación electromagnética a la guía de onda bimodal, siendo estos medios seleccionados entre el grupo constituido por: radiación longitudinal, enfoque directo, acoplamiento por prisma y acoplamiento por red de difracción. La cantidad de luz acoplada en el interior de la guía de onda de salida depende de la distribución de intensidad en la intersección de la guía de onda bimodal y la guía de onda de salida.

50 En otra realización, el interferómetro comprende, además, medios de acoplamiento configurados para acoplar a la guía de onda bimodal modos de luz de orden primero y segundo con diferentes ángulos de incidencia. Como opción, el medio de acoplamiento es una red de difracción acoplada a una entrada de la guía de onda bimodal.

Preferiblemente, la guía de onda bimodal comprende al menos dos capas; en este caso, una primera capa de guía

de onda tiene un primer índice de refracción y una segunda guía de onda tiene un segundo índice de refracción. El índice de refracción de la segunda capa es más bajo que el de la primera capa de guía de onda.

5 Los índices de refracción efectivos del modo de orden cero y del de orden primero son sustancialmente diferentes. Esta dispersión diferente de los modos de propagación transversales depende de la velocidad en los parámetros de la guía de onda.

Como opción, el interferómetro comprende, además, dispositivos de detección para medir cambios de intensidad de radiación en la salida de la guía onda, provocados por el estímulo de entrada. En una realización particular, el medio de detección es un fotodetector de dos secciones.

10 Otro aspecto de la invención se refiere a un chip que comprende al menos un interferómetro de guía de onda óptica plana, como el anteriormente mencionado.

Otro aspecto de la invención se refiere a un sensor que comprende un interferómetro de guía de onda óptica plana, como el anteriormente mencionado.

15 Finalmente, la presente invención está relacionada con un procedimiento de detección que comprende los pasos de : (a) definir una ventana de detección en una zona seleccionada de una guía de onda bimodal de interferómetro de guía de onda bimodal óptica;(b) colocar un estímulo químico, biológico o físico en la ventana de detección; (c) introducir o causar cambios en el estímulo; (d) acoplar un modo de orden cero y un modo de orden primero de radiación electromagnética en la guía de onda bimodal, de forma que cuando ambos modos viajan a través de de la ventana de detección definida en la guía de onda bimodal, sufren un retardo de fase que depende de los cambios en el estímulo; (e) medir la respuesta de la orden cero con respecto a la respuesta de la orden primero, en la salida de la guía de onda bimodal; y (f) relacionar las respuestas relativas de ambos modos con los cambios producidos en el estímulo.

20

Preferiblemente, el paso de medición de la respuesta del modo de orden cero con respecto al de orden primero comprende, además: la generación de un patrón de franjas interferencias; y la medición de un desplazamiento del patrón de interferencia. Además, el paso de relacionar las respuestas relativas de ambos modos con los cambios dados estímulo comprende, además, relacionar el desplazamiento del patrón de interferencia con la presencia de cambios en el estímulo de interés.

25

Las ventajas de la invención propuesta se pondrán de manifiesto en la siguiente descripción.

### Breve descripción de los dibujos

30 Para completar la descripción y facilitar el entendimiento de la invención, se adjunta un juego de dibujos. Dichos dibujos constituyen una parte integrante de la descripción e ilustran una realización preferida de la invención, que no debe interpretarse de forma restrictiva con respecto al ámbito de la invención, sino solo como un ejemplo de cómo puede materializarse la invención. Los dibujos comprenden las siguientes figuras:

Las figuras 1a a 1c son representaciones esquemáticas de interferómetros ópticos de guía de onda según la presente invención.

35

La figura 1d representa un ejemplo de la distribución de intensidad de los modos de propagación en dirección transversal en un interferómetro óptico de guía de onda según la presente invención.

La figura 2a ilustra un ejemplo de un interferómetro y un sensor según la presente invención.

La figura 2b muestra una implementación del ejemplo de la figura 2a.

40 La figura 3 ilustra un ejemplo de un interferómetro y un sensor según la presente invención.

La figura 4 ilustra un ejemplo de un interferómetro y un sensor según la presente invención.

La figura 5 muestra una guía de onda plana bidimensional del estado de la técnica anterior.

Las figuras 6 y 7 representan una guía de onda en las que se explican los significados de "transversal" y "lateral" según la presente invención.

45 La figura 8 muestra dos simulaciones de las señales detectadas en la salida de un interferómetro de la invención.

La figura 9 muestra una simulación de cómo el índice refractivo de la capa de revestimiento influye en las constantes de propagación de los dos modos según la invención.

La figura 10 representa, la sensibilidad respecto del índice de refracción de la capa de revestimiento según la invención.

50 La figura 11 muestra una vista esquemática de un montaje experimental de un sensor según la invención.

Las figuras 12a y 12b muestran la respuesta del sensor de la figura 11 en condiciones distintas.

### Descripción de las realizaciones preferidas de la invención

En el contexto de la presente invención deberán tenerse en cuenta las siguientes definiciones:

Como muestra la figura 6, un "modo transversal" de un haz de luz de radiación electromagnética es un patrón de intensidad particular de la radiación medida a lo largo de una línea formada por un plano (plano 1 o plano YOZ), perpendicular a la dirección de propagación del haz de luz y un plano (plano 2 o plano XOY) perpendicular a una estructura de guía de onda y que transcurre a lo largo de la dirección de propagación. En el contexto de la presente invención, el término "vertical" se considera sinónimo de "transversal".

Como muestra la figura 7, un "modo lateral" de un haz de luz de radiación electromagnética es un patrón de intensidad particular de la radiación medida a lo largo de una línea formada por un plano (plano 1 o plano YOZ) perpendicular a la dirección de propagación del haz de luz y a un plano (plano 3 o plano XOZ), en el que descansa una estructura de guía de onda, y que transcurre a lo largo de la dirección de la propagación. En el contexto de la presente invención, el término "horizontal" se considera sinónimo de "lateral".

Los modos transversal y lateral pueden clasificarse en modos TE (transversal eléctrico) y modos TM (transversal magnético). Los modos TE son aquellos que carecen de campo eléctrico en la dirección de propagación, mientras que los modos TM son aquellos que carecen de campo magnético en la dirección de propagación.

La "dispersión" de un modo de guía de onda es una dependencia de la velocidad de propagación de dicho modo en los parámetros de la guía de onda y las capas que lo rodean.

Se entiende por "analito", cualquier solución que contenga una sustancia susceptible de ser detectada por el interferómetro y el sensor de la presente invención.

La implementación de la presente invención puede ejecutarse de la siguiente forma:

La figura 1a muestra una representación esquemática de una única guía de onda óptica 10 que soporta dos modos de la presente invención. Los dos modos que la guía de onda 10 es capaz de soportar son modos transversales (TE o TM): un modo TE o TM fundamental y un modo TE o TM de orden primero. Aunque se podrían elegir dos modos laterales, para evitar las desventajas anteriormente mencionadas y derivadas de estructuras que confinan dos modos laterales, se elige y diseña una estructura configurada para confinar dos modos transversales.

Esta guía de onda óptica 10 actúa como un interferómetro. La guía de onda óptica 10 comprende al menos una capa 2 de material ópticamente transparente depositado a modo de lámina sobre el sustrato 8. Preferiblemente, la guía de onda 10 comprende varias capas 1, 2, 3 de material ópticamente transparente, depositado en forma de lámina sobre el sustrato 8. El índice de refracción de la capa 2 es mayor que el de las capas adyacentes 1 y 3. Por tanto, en este caso, la guía de onda óptica 10 es una guía de onda óptica de tipo slab. La guía de onda 10 puede tener una sola capa: Una capa 1 sobre el sustrato es suficiente, pues, como se explica posteriormente, un analito depositado en la capa superior (que puede ser la única capa) forma también una capa (una capa de revestimiento) encima de la guía de onda 10. Por tanto, se cumple el principio operativo del interferómetro según el cual la luz viaja por una estructura que posee zonas de diferente índice de refracción, siendo esas dos zonas, la guía de onda 10 monocapa (soportada en el sustrato 8) y el analito o capa de revestimiento depositada sobre la misma. Preferiblemente se utilizan varias capas 1, 2, 3 para optimizar la estructura.

La guía de onda 10 comprende, además, medios de confinamiento 9 capaces de confinar la luz en dirección lateral. Gracias a estos medios de confinamiento 9, la guía de onda 10 puede soportar al menos un modo lateral.

Cabe subrayar, que en una situación ideal con una guía de onda perfecta, en la que se proporciona el confinamiento en dirección transversal, un haz de luz con una distribución lateral relativamente ancha (de 1 milímetro aproximadamente, por ejemplo) se propagaría de forma sustancial sin divergencia. Esto significa que tras haberse propagado de forma transversal varios milímetros, el haz de luz mantendría la misma anchura para aproximadamente 1 mm. En éste caso no se necesitarían ni costilla ni arista. Sin embargo, los haces anchos hacen que la guía de onda sea voluminosa e ineficaz a la hora de integrar muchas guías de onda en una matriz en el mismo chip. Volviendo a los haces de luz estrechos (con una anchura inferior a aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ ) la luz en el interior de tales guías de onda se vuelve muy divergentes, es decir, tras propagarse de forma transversal varios milímetros, el haz de luz diverge y se expande varios milímetros en dirección lateral. Esto hace que el dispositivo sea ineficaz. En otras palabras, en la práctica, el uso de una operación monomodo en dirección lateral es extremadamente difícil de mantener en una estructura plana simple. Asimismo, cuanto más larga es la guía de onda, más difícil es mantener una operación monomodo en dirección lateral. Por ello, los medios de confinamiento tipo costillas, aristas, etc. son necesarios.

La operación monomodo en dirección lateral facilita además el modelado del interferómetro cuando actúa como un sensor, y hace que su comportamiento sea predecible.

Algunos ejemplos no restrictivos de medios de confinamiento 9 que pueden proporcionar tal confinamiento son una

- costilla, una arista o un gradiente. Así, son guías de onda apropiadas: estructuras de costilla, arista, gradiente u otras estructuras de guía de onda. La guía de onda 10 permite, por tanto, la propagación de radiación electromagnética incidente en la dirección representada por la longitud de la guía de onda 10, es decir, en la dirección representada por la flecha que sale de la fuente óptica 4. La guía de onda 10 es preferiblemente una guía de onda rectangular, para que los modos queden confinados transversal y lateralmente. El hecho de que la guía de onda sea rectangular no significa que en el plano perpendicular a la dirección de propagación, la guía de onda posea necesariamente un perfil rectangular. Por el contrario, la sección transversal de la guía de onda puede tener un pequeño escalón que forma una estructura de guía de onda de tipo costilla.
- En una realización particular, la guía de onda 10 es una guía de onda de tipo costilla. Esto está ilustrado en la figura 1a; en la que la guía de onda 10 comprende una costilla 9 en dirección lateral (según el esquema de la figura 5) Ésta costilla 9 implica que el grosor de la guía de onda 10 varíe a lo largo de dicha dirección lateral. La figura 1b muestra otra vista de la misma guía de onda 10 que tiene, una costilla 9. La referencia 19 de la figura 1c representa otro tipo de guía de onda 10. En la figura 1b, se muestran las tres direcciones de propagación: dirección longitudinal X, (que es la dirección de propagación de la luz), dirección transversal Y, y dirección lateral Z.
- Como se puede apreciar, la estructura de la presente invención es homogénea en cuanto a la dirección de la propagación de la luz, mientras que la estructura divulgada en el documento JP2004145246 es homogénea o uniforme en dirección lateral.
- Aunque no se muestra en las figuras 1a-1c, la estructura comprende también una ventana o zona de detección que se forma en una superficie de la guía de onda mediante una fotolitografía estándar y un grabado húmedo. Esta ventana de detección se representa en las figuras 2 a 4.
- Una de las ventajas de esta estructura bidimensional es que la guía de onda confina una luz monomodo (por tanto, es capaz de propagar luz) a lo largo de varios centímetros sin divergencia de luz en dirección lateral. Es necesaria una operación monomodo en dirección lateral, por las siguientes razones: primero, porque cuando la guía de onda se usa como interferómetro o como sensor, sirve para evitar ambigüedades en el control del patrón de interferencia, que se crea en el extremo de la guía de onda. Segundo, porque las guías de onda estrechas, que solo se pueden implementar mediante estructuras bidimensionales (ej. tipo costilla, arista, etc.) permiten comprimir la zona de detección a una fracción de milímetro cuadrado. La zona de detección puede variar de aproximadamente 0,05 a aproximadamente 1 mm<sup>2</sup>. Como ejemplo, una guía de onda de 0,01 mm de ancho y 15 mm de largo posee un área de 0,15 mm<sup>2</sup>.
- La sensibilidad es de gran importancia en la presente invención. La estructura ha de ser lo suficientemente larga para operar como un interferómetro de guía de onda, pues su sensibilidad es proporcional a la longitud de la ventana o zona de detección o a la longitud de la guía de onda bimodal. Por consiguiente, la longitud de la estructura está preferiblemente en un intervalo de entre aproximadamente 0,5 y aproximadamente 5 cm.
- La figura 1c muestra cómo la guía de onda 10, formada por una guía de onda 10, puede ser fabricada por implantación. La referencia 18 representa una zona en la que se implanta la guía de onda 19. El índice de refracción cambia en esta zona 18. Tal guía de onda sufre un cambio espacial con respecto al índice de refracción en dirección transversal y lateral, mientras que geoméricamente continúa siendo una estructura de tipo slab plana.
- La luz de una fuente 4 puede transmitirse al extremo de entrada 5 de la guía de onda 10, para de este modo iluminar la capa 2. Preferiblemente, la fuente de luz 4 proporciona luz que posee una longitud de onda que cae dentro del intervalo de visible o infrarrojo próximo; tal intervalo es de entre aproximadamente 400 y aproximadamente 1600 nm. La fuente de luz 4 es preferiblemente una fuente de láser.
- Por tanto, los dos modos de propagación transversales están igualmente excitados y viajan a lo largo de la guía de onda 10, acumulando una diferencia en el retardo de fase. En el extremo de salida 6 de la guía de onda 10, la luz puede radiar de la superficie del extremo a una pantalla o dispositivo de medida 7. La distribución de intensidad representa el retardo de fase relativo acumulado. Los detectores, tales como uno o más de uno fotodiodo, son ejemplos no restrictivos de dispositivos de medición. Si se utiliza más de un fotodiodo, se disponen en una matriz, como una matriz bidimensional de fotodiodos o una cámara CCD.
- Los elementos ya descritos y representados en la figura 1a forman un interferómetro de guía de onda óptica plana 15.
- Los dos modos transversales son capaces de exhibir una respuesta relativa medible ante un cambio en la longitud de onda de radiación electromagnética incidente o en un entorno localizado. Si el índice de refracción de la capa 1 cambia localmente, se acumula un retardo de fase relativo distinto y la distribución de intensidad se ve modificada de forma correspondiente. Los modos de guía de onda óptica transversales poseen un campo eléctrico, distribuido entre las capas 1, 2, 3, y en algunos casos a través del sustrato 8 de la estructura de guía de onda 10. La cantidad

relativa de energía contenida en las capas 1, 2, 3 determina el "índice de refracción efectivo" del modo de la guía de onda. A su vez, el índice efectivo de refracción de un modo determina la velocidad de propagación de ese modo y, por tanto, la cantidad de retardo de fase que puede acumularse a medida que el modo viaja a través de la guía de onda 10. Si el índice de refracción de la capa 1, 2, 3 cambia, la distribución de campo también cambia, y como resultado se produce un cambio en el índice de refracción efectivo. Si las propiedades de dispersión de los modos son distintas puede haber un gran cambio en el índice de refracción efectivo. Las constantes de propagación para los modos de orden fundamental y primero dependen del índice de refracción de la capa superior o de revestimiento. Como se ha ya mencionado, cuando la guía de onda óptica 10 actúa como un interferómetro y un analito se deposita sobre la capa superior 1, el analito actúa como capa de revestimiento. En otras palabras, es necesario que la dispersión (es decir, la dependencia de las constantes de propagación en el índice de refracción) sea distinta para cada modo. El patrón de interferencia de ambos modos en el extremo de la guía de onda depende del índice de refracción de las capas combinadas y, por consiguiente, del índice de refracción de la solución del analito.

La figura 1d representa un ejemplo de la distribución de intensidad de los modos de propagación en dirección transversal. La distancia en dirección transversal viene indicada en el eje X, en nm. La intensidad normalizada del campo eléctrico viene indicada en el eje Y (no siendo la magnitud tan importante como la respuesta o forma efectiva). En la figura 1d, la referencia 11 representa una distribución de intensidad del modo fundamental. Las referencias 12 y 13 representan la distribución de intensidad del modo de orden primero. Como puede verse en la figura 1d, el efecto de dispersión viene dado por la marcada diferencia entre las distribuciones de energía de ambos modos

La estructura de guía de onda óptica 10, que forma un interferómetro óptico puede fabricarse de forma ventajosa utilizando cualquier combinación adecuada de materiales habituales. Algunos ejemplos de procedimientos convencionales de elaboración son los basados en la Deposición Química en fase de Vapor (CVD), como la Deposición Química en fase Vapor Asistida por Plasma (PECVD) o Deposición química en fase vapor a baja presión (LPCVD)

La Deposición Química en fase de Vapor (CVD), es un procedimiento químico utilizado para producir materiales sólidos de gran rendimiento y pureza, como capas delgadas. En un procedimiento CVD típico, la oblea (sustrato) se expone a uno o varios precursores volátiles, que reaccionan y/o se descomponen en la superficie del sustrato para producir el depósito deseado. En los procedimientos de microfabricación se utiliza comúnmente la CVD para depositar materiales en varias formas, entre ellas, monocristalino, policristalino, amorfo y epitaxial. Entre éstos materiales se cuentan: silicio, fibra de carbono, filamentos, nanotubos de carbono, SiO<sub>2</sub>, silicio-germanio, wolframio, carburo de silicio, nitruro de silicio, oxinitruro de silicio, nitruro de titanio, y varios dieléctricos de k.

Por ejemplo, el índice de refracción de una guía de onda óptica de oxinitruro de silicio de grosor constante (normalmente en el intervalo de entre 0,3 y 0,5 micrómetros) podría seleccionarse en cualquier valor del intervalo de entre 1,457 y 2,00.

Preferiblemente, el primer y segundo modo de guía de onda pueden exhibir una respuesta relativa medible ante un cambio en un entorno localizado, causado por los cambios introducidos en un estímulo físico, biológico y/o químico de interés. La a respuesta es causada por el campo evanescente de los modos, que se extienden por el entorno localizado. Un ejemplo de introducción de un cambio en un estímulo es un cambio en el índice de refracción del material (ej. analito), situado en ese entorno. A consecuencia de ese cambio, los modos primero y segundo de las guías de onda acumulan un retardo de fase relativo diferente, produciéndose así una respuesta relativa medible.

Esto significa que el interferómetro de guía de onda óptica plana 15 puede utilizarse de forma ventajosa para detectar la presencia de cambios en un estímulo físico, biológico y/o químico, de un analito introducido en un entorno localizado. De este modo el interferómetro de guías de onda óptica se convierte en un interferómetro de guía de onda de sensor químico o en un sensor basado en guía de onda óptica. Algunos ejemplos no restrictivos de interacción del estímulo con los modos de guía de onda son: interacción de enlace, interacción de absorción o cualquier otra interacción. Por ejemplo, un analito en fase líquida o gaseosa que comprende estímulos químicos, puede ser introducido en el entorno localizado del interferómetro de guía de onda óptica. Como alternativa, en dicho entorno puede darse una reacción química, que produzca cambios en la naturaleza de los estímulos químicos in situ y causen de este modo un cambio en el entorno localizado.

El entorno localizado, también denominado capa o ventana de detección, es preferiblemente una zona o superficie de la capa superior 1 de la guía de onda óptica 10 (no mostrada en las figuras 1a-1c). Esta capa de detección puede comprender un material elegido en el siguiente grupo: materiales absorbentes y materiales bioactivos. Algunos ejemplos no restrictivos de materiales absorbentes son los materiales polímeros, como el polixilosano o los polímeros impresos. Un material absorbente puede absorber gases, líquidos o vapores que comprendan un

estímulo químico concreto. Algunos ejemplos no restrictivos de materiales bioactivos son aquellos que comprenden anticuerpos monoclonales y policlonales, enzimas, fragmentos de ADN, ARN, aptámeros, APN, proteínas funcionales o células enteras. Un material bioactivo puede ser apropiado para la biodetección en fase líquida o gaseosa.

5 Dentro de la guía de onda bimodal 10 (que actúa como un interferómetro) se genera un patrón de interferencia cuando la radiación electromagnética se propaga a lo largo de la guía de onda 10. Los cambios ya mencionados, dados en un estímulo en el entorno localizado o ventana de detección, o un cambio en la longitud de onda pueden calcularse por medio del cambio de fase relativa del patrón de interferencia. La respuesta medible a dicho cambio se representa mediante un desplazamiento de las franjas en el patrón de interferencia. El cambio de fase relativa de la radiación dentro del interferómetro puede calcularse midiendo dicho desplazamiento de franjas. En la salida 6 de la guía de onda 10, la radiación electromagnética se acopla en el espacio libre. Por tanto, el patrón de interferencia se puede registrar de forma convencional (por ejemplo, usando un sólo detector 7 que mide los cambios en la intensidad de la radiación o usando varios de tales detectores 7, que controlan los cambios dados en una serie de franjas, o en todo el patrón de interferencia). Tales detectores 7 son preferiblemente uno o varios fotodetectores. Cuando se utilizan uno o más fotodetectores, se disponen en una matriz, como una matriz de fotodiodos bidimensionales.

Como muestra la figura 1a, la luz de la fuente 4 se enfoca en el extremo de entrada 5 de la guía de onda 10 y se propaga en forma de radiación electromagnética, la cual se puede acoplar en los modos primero y segundo de guía de onda de distintas formas.

20 En una realización particular, la radiación se acopla simplemente a la guía de onda 10 por medio de la cara de extremo 5 de dicha guía de onda 10. Esto se conoce también como "procedimiento de radiación longitudinal". En este caso, la fuente de luz (ej. láser) está integrada en la estructura laminada 1, 2, 3, en el sustrato común 8. Algunos ejemplos no restrictivos de sustratos 8 son sustratos de fosfuro de silicio y de indio.

25 Como alternativa, el interferómetro 15 comprende otros medios de acoplamiento para acoplar la radiación electromagnética incidente a los modos de guía de onda primero (fundamental) y segundo (de orden primero), de la guía de onda 10. Este acoplamiento de ambos modos se hace, sustancialmente, de forma simultánea. Algunos ejemplos no restrictivos de medios de acoplamiento, aparte de la radiación longitudinal, son enfoque directo (por ejemplo, con un láser HeNe), acoplamiento por prisma, acoplamiento por red de difracción o acoplamiento por espejo.

30 Como opción, la luz incidente o radiación electromagnética puede orientarse (ej. polarizada en plano) como convenga utilizando medios de polarización apropiados. Algunos ejemplos no restrictivos de medios de polarización son cubos divisores de haz por polarización, polarizadores lineales de vidrio y polarizadores de rejilla de alambre.

35 Como opción, la luz incidente o la radiación electromagnética puede enfocarse utilizando medios de enfoque. Algunos ejemplos no restrictivos de tales medios son: una lente, una micro-lente y un sistema óptico que comprenda una serie de lentes.

Como opción, el patrón de radiación electromagnética de salida puede proyectarse hacia el detector mencionado anteriormente con medios de proyección. Algunos ejemplos no restrictivos de tales medios son las lentes objetivo, las lentes y la proyección directa sobre fotodetector multisección.

40 A continuación, se describen algunos ejemplos de interferómetros basados en guías de onda bimodales y sensores basados en interferómetros.

45 La figura 2 muestra un ejemplo de interferómetro 25 que comprende una guía de onda bimodal 20, formada por una o varias capas, como muestran las figuras 1a, 1b y 1c. En su superficie superior, la guía de onda 20 comprende una ventana de detección 21, en la que puede depositarse un analito. Los modos de guía de onda (de orden fundamental y primero) se excitan en la guía de onda 20 usando el enfoque directo de la luz procedente de una fuente de láser (no se muestra en la figura 2) por medio de una lente objetivo 22. Una estructura se considera asimétrica en dirección transversal, si la distribución del índice de refracción a través de la estructura en dicha dirección no es simétrica con respecto al eje de simetría de la estructura. El eje de simetría de la estructura es un eje que transcurre en la dirección de propagación de la luz y que cruza el plano perpendicular a la dirección de propagación de la luz, en un punto donde se encuentra la distribución de intensidad máxima de la distribución de campo electromagnético de un modo fundamental transversal. Por tanto, la estructura de la figura 5 es asimétrica. Como la estructura es asimétrica y el eje central de la lente objetivo 22 puede desalinearse en dirección transversal con respecto al eje de simetría de la capa de la guía de onda, se excitan tanto el modo de orden cero (fundamental), como el de orden primero. Los dos modos transversales se propagan a distintas velocidades y pasan por la ventana de detección 21. El patrón de interferencia que se forma en el extremo de salida 16 de la guía



de onda 20 se proyecta en un fotodetector de dos secciones (TSP) 27, usando una lente objetivo 29 como medio de proyección y amplificación. La posición del máximo del patrón de interferencia viene definida, entre otros parámetros, como el índice de refracción, el grosor de cada capa, la longitud y la anchura de la guía de onda, por la fase inicial de las ondas excitadas y por el índice de refracción del analito que pasa a través de la ventana de detección 21. Así, el cambio queda registrado en el índice de refracción de la capa de revestimiento (medido en la ventana de detección), causado por una reacción química o biológica ocurrida en la superficie de la guía de onda o por cambios en la solución del analito.

Los bloques 28 se refieren a las paredes de una célula microfluídica, que se puede acoplar a la guía de onda 20 para proporcionar fluido e intercambio del analito. No son parte de la presente invención.

La figura 2b muestra una implementación del ejemplo de la figura 2a. El patrón de interferencia en dirección transversal puede distribuirse con el máximo situado en la parte inferior o superior de la guía de onda, como muestra la figura 2b, donde las distribuciones de intensidades de luz, en la sección transversal de guía de onda aparecen en el recuadro. Las distribuciones están diseñadas para una guía de onda con un índice de refracción de 2.0 (nitruro de silicio) y con un grosor de 400 nm. La diferencia de fase entre los modos varía en  $\pi$  radian de una curva a otra. Bajo ciertas condiciones la diferencia entre las energías concentradas en la sección superior e inferior del fotodetector puede alcanzar -17 dB. La intensidad de salida es proporcional a la cantidad de luz acoplada a la entrada de la guía de onda. Si la absorción en la guía de onda es constante, entonces la energía total de la luz a la salida es proporcional a la energía acoplada a la entrada, exceptuando algunos cambios provocados por la reflexión proveniente de la faceta de salida, la cual, según las simulaciones, cambia ligeramente con el movimiento del patrón de interferencia. Dando por conocida la función del cambio de reflectividad, pueden reducirse las ambigüedades debidas a las variaciones de eficiencia de acoplamiento, porque el hecho de controlar con un fotodetector de dos secciones (TSP) permite registrar de forma simultánea tanto la energía total, como el cambio de distribución de la luz que sale de la guía de onda bimodal (BiMW).

La figura 3 representa un ejemplo de interferómetro 35 que comprende una guía de onda bimodal 30, formada por una o más capas como muestran las figuras 1a, 1b y 1c. En su superficie superior, la guía de onda bimodal 30 comprende una ventana de detección 31 en la que puede depositarse un analito. El interferómetro 35 comprende, en ambos extremos de dicha guía de onda bimodal 30, guías de onda monomodo 31, 32. Tanto la guía de onda de entrada 31 como la guía de onda de salida 32 son monomodo en dirección lateral y transversal. El único parámetro que varía de la parte monomodo 31, 32 a la parte bimodal 30 es el grosor. Esto implica que el grosor de estas dos guías de onda 31, 32 es menor que el grosor de la guía de onda bimodal 30. La luz se acopla a la guía de onda 32 de entrada con cualquier medio de acoplamiento convencional, como la radiación longitudinal, el enfoque directo, el acoplamiento por prisma o el acoplamiento por red de difracción. El medio de acoplamiento particular utilizado en el interferómetro 35 de la figura 3 es el acoplamiento directo por medio de una lente enfocada 34. Al no ser una estructura simétrica en la intersección de la guía de onda 32 de entrada - la guía de onda bimodal 30, el modo fundamental (que es el único modo que se propaga a través de la guía de onda 32 de entrada) se divide en dos modos: de orden fundamental y de orden primero, en la guía de onda bimodal 30. La relación entre las amplitudes de los modos viene definida por la geometría de la estructura o, más exactamente, por el grosor de las guías de onda 32, 30, 31. La optimización del grosor de la guía de onda es un problema ingenieril que puede solucionarse sobre la base de procedimientos convencionales de modelado. La cantidad de luz acoplada a la salida de la guía de onda 33 depende de la distribución de intensidad en la intersección de la guía de onda bimodal 30-guía de onda de salida 33. En este ejemplo, la lectura de la señal de salida, que sale de la guía de onda 33, se lleva a cabo con un fotodetector convencional 37, como un fotodiodo. El patrón de interferencia de salida se proyecta en dicho fotodetector 37 usando como medio de proyección una lente objetivo 39.

La figura 4 representa un ejemplo de interferómetro 45 que comprende una guía de onda bimodal 40 depositada en un sustrato 48. En su superficie superior, la guía de onda bimodal 40 comprende una ventana de detección 41, en la que se puede depositar un analito. La luz se acopla a la guía de onda bimodal 40 mediante un acoplador de red de difracción 42, montado o integrado en la guía de onda bimodal 40. Los modos de orden fundamental y primero se excitan por haces de luz (ej. láser) provenientes de una única fuente (no representada en la figura 4), y se dirigen al acoplador de red de difracción 42 formando distintos ángulos de incidencia  $\theta_0$   $\theta_1$ , correspondientes a la condición de coincidencia de fase en cada modo. Ambos modos se difractan por el acoplador de red de difracción 42 y se propagan a través de la guía de onda bimodal 40.

Como se ha mencionado ya, la sensibilidad es proporcional a la longitud de la ventana de detección o a la longitud de la guía de onda bimodal. A continuación, se analiza la sensibilidad del dispositivo de la figura 2b.

Si se usa el enfoque de matriz de transferencia, se crean las distribuciones de intensidades de luz para cada modo de una guía de onda, con un índice de refracción 2,0 (nitruro de silicio) en un sustrato de silicio (índice de refracción 1,46), y un índice de refracción variable de la capa de revestimiento. Luego, las distribuciones de patrón

de interferencia en la salida de la guía de onda y las señales correspondientes generadas por las secciones del fotodetector, se calculan como una función del cambio de fase entre los modos. Las señales producidas por las secciones del fotodetector se calculan de nuevo, como cambio relativo,  $S_r$ , de la señal de salida según la expresión:

$$S_r = \frac{U_{up} - U_{down}}{U_{up} + U_{down}} \quad (1)$$

5

en la que  $U_{up}$ ,  $U_{down}$  son las señales generadas por las secciones inferior y superior del fotodetector respectivamente. Los resultados de las simulaciones ( $S_r$  frente al cambio de fase) se presentan en la figura 8. Todos los cálculos se realizaron para una guía de onda de 632,8 nm. Las amplitudes de los modos fueron previamente normalizadas a la unidad. La curva trazada para la guía de onda de 400 nm de grosor (línea gruesa) es algo más pronunciada que la guía de onda de 300 nm de grosor (línea de puntos). La razón es que la distribución asimétrica de los modos de la guía de onda es aún mayor en guías de onda delgadas. Sin embargo, la diferencia entre las pendientes de las curvas no es tan significativa:  $4/\pi$  para la guía de 300 nm de grosor y  $4,3/\pi$  para la guía de 400 nm de grosor.

10

Si tomamos una guía de onda bimodal uniforme con modos que se propagan sobre una distancia  $L$  hasta la salida de la guía de onda, la sensibilidad del dispositivo, definida como un cambio en la señal de salida por cambio del índice de refracción del revestimiento, se puede expresar con la fórmula:

15

$$Sens = \frac{\partial S_r}{\partial n_{cl}} = \frac{\partial S_r}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial n_{cl}} \quad (2)$$

en la que  $n_{cl}$  es el índice de refracción de la capa de revestimiento y  $\varphi$  es la diferencia de fase entre los modos.

20

La diferencia de fase debida a un cambio en el índice de refracción de la capa de revestimiento tras una cierta distancia  $L$  se expresa así:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (\Delta n_{eff}^1 - \Delta n_{eff}^0) \cdot L \quad (3)$$

donde  $L$  es la longitud de la ventana de detección,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $\Delta n_{eff}^0$ ,  $\Delta n_{eff}^1$ , es el cambio del índice de refracción efectivo, de los modos de orden cero y primero respectivamente, debido a los cambios en el índice de refracción de la capa de revestimiento. Tras sustituir (3) por (2) se obtiene la expresión de la sensibilidad del dispositivo:

25

$$Sens = \frac{\partial S_r}{\partial \varphi} \left( \frac{\partial n_{eff}^1}{\partial n_{cl}} - \frac{\partial n_{eff}^0}{\partial n_{cl}} \right) \frac{2\pi}{\lambda} L \quad (4)$$

El índice de refracción de la capa de revestimiento afecta de forma distinta a las constantes de propagación  $n_{eff}^0$  de los modos de orden fundamental y  $n_{eff}^1$  de los  $s$  modos de orden primero. Las derivadas  $\frac{\partial n_{eff}^1}{\partial n_{cl}}$ ,  $\frac{\partial n_{eff}^0}{\partial n_{cl}}$  están representadas en la figura 9 como una función del índice de refracción de la capa de revestimiento. Las líneas de puntos corresponden al modo fundamental y las líneas gruesas al primer modo. El grosor de la guía de onda corresponde a:  $\square$  - 300 nm,  $\circ$  - 350 nm,  $\Delta$  - 420 nm,  $\nabla$  - 470 nm. Obviamente, cuanto más penetren los modos de la guía de onda en el revestimiento, mayor será la modulación del índice de refracción efectivo para ambos modos.

30

La penetración de los modos es inversamente proporcional al grosor de la guía de onda y proporcional a  $n_{cl}$ . Las derivadas mostradas en la figura 9, referidas a ambos modos, aumentan a medida que lo hace el índice de refracción de la capa de revestimiento. Sin embargo, la constate de propagación del modo de orden primero se ve muy afectada por los cambios en el índice de refracción del revestimiento. La diferencia entre las derivadas es especialmente significativa, luego, la sensibilidad es mayor en las guías de onda delgadas. Por ejemplo, en una guía de onda de 300 nm de grosor, la sensibilidad puede ser tres veces más alta que en un guía de onda de 470 nm de grosor.

35

40

La sensibilidad, expresada en términos de cambio de fase por unidad de índice refracción, puede apreciarse en la figura 9 y la expresión (3). Por tanto, en una guía de onda de 300 nm de grosor y 10 mm de longitud se puede

alcanzar un cambio de fase de  $2\pi$ , si el índice de refracción de la capa de revestimiento cambia en  $6 \times 10^{-4}$  RIU (Unidad de índice de refracción), cuando  $n_{cl}$  es aproximadamente 1,34.

En la figura 10 la sensibilidad  $Sens$ , calculada mediante la expresión (4), se indica frente al índice de refracción de la capa de revestimiento para cuatro grosores de guía de ondas:  $\square$  - 300 nm,  $\circ$  - 350 nm,  $\Delta$  - 420 nm,  $\nabla$  - 470 nm. La sensibilidad es el cambio en el cambio de índice de refracción por unidad de la señal de salida en la capa de revestimiento. Los cálculos se realizaron tomando como referencia una guía de onda de 10 mm de largo. Este parámetro define el nivel base de ruido permitido en el sistema de circuitos de detección para distinguir cambios en el patrón de interferencia. Al trabajar con guías de onda de menos de 400 nm, se observa que una precisión del 1% es suficiente para leer la señal de salida. La sensibilidad del dispositivo propuesto es comparable a la sensibilidad del IMZ integrado fabricado con tecnologías de silicio.

A continuación se proporciona un ejemplo de elaboración: una oblea de silicio, pulida en un lado, se somete a oxidación a altas temperaturas. Una capa de dióxido de silicio de aproximadamente  $2\ \mu\text{m}$  de grosor se forma en ambos lados de la oblea (la parte donde se colocan los componentes, formando la guía de onda, y la parte de atrás), como resultado de este proceso. Una capa de nitruro de silicio de aproximadamente 400 nm de grosor se deposita por técnica LPCVD en la parte de los componentes y la de atrás. Una capa de dióxido de silicio de PEVCD se deposita en la parte delantera de la oblea. Las guías de onda se imprimen por la parte delantera mediante una fotolitografía convencional y un grabado húmedo en ácido hidrofluorhídrico tamponado (HF). La fotoresistencia se elimina con plasma de oxígeno. La oblea se sumerge en solución HF durante un período suficiente para eliminar la máscara de dióxido de silicio y para formar de manera simultánea costillas en el nitruro de silicio. Se usa el grabado selectivo (se elige el grosor del óxido de PECVD que sea proporcional a la altura de la costilla). La selectividad del grabado (silicio)/(nitruro de silicio) es de 1000/14 aproximadamente, si el grabado se realiza con una solución de grabado con  $\text{SiO}$  (similar a HF10%). Esta tecnología permite la fabricación de guías de onda costilla, con una altura de costilla de aproximadamente 4 nm y un grosor de aproximadamente  $4\ \mu\text{m}$ . La guía de onda resultante puede soportar dos modos transversales. Es, por tanto, bimodal con un modo fundamental y un modo de orden primero. Una capa de óxido de silicio se deposita entonces en la parte de los componentes como capa protectora. Se forma una ventana de detección en la superficie de la guía de onda usando una fotolitografía estándar y un grabado húmedo en una solución de grabado con  $\text{SiO}$ .

Para el experimento actual se ha utilizado una guía de onda de  $3\ \mu\text{m}$  de ancho que soportaba un monomodo en dirección lateral. La oblea se seccionó en chips y éstos se pulieron para que las caras de extremo de la guía de onda estuvieran pulidas. El chip se montó sobre una base de aluminio y se cubrió con un remate microfluídico de polimetacrilato (PMMA), provisto de un canal para que el reactivo fluya por la guía de onda. La longitud de la ventana de detección  $L$  era de 3 mm.

A continuación se describe un biosensor basado en una guía de onda bimodal óptica según la invención. Los experimentos acerca de la detección de cambios en el índice de refracción del reactivo se realizaron por inyección de agua: solución de glicerina en el canal. En la figura 11 se muestra una vista esquemática del montaje experimental. Una bomba peristáltica suministraba el flujo. La luz se inyectaba en la guía de onda  $20'$  a través de una lente objetivo  $52$ , enfocada hacia un haz proveniente de un láser He-Ne  $4'$ . En este caso, el láser es un láser HeNe de 10 mW, que comprende, asimismo, un expansor de haces. Una ligera desalineación del objetivo con respecto a la guía de onda en dirección vertical permite que ambos modos se exciten simultáneamente. Otra lente objetivo  $29'$  captaba la luz y la imagen de la faceta de la guía de onda se proyectaba en el TSP  $27'$ . Se estabilizó la señal mientras el agua desionizada pasaba por la ventana de detección  $51$ . La válvula  $53$  se usa para dirigir un flujo, con o sin reactivo, a un canal que pase por la célula microfluídica situada en la ventana de detección  $51$ . Luego, se inyectaron en el canal soluciones con tres concentraciones diferentes, con índices de refracción 1,3356, 1,337, y 1,39. En las figuras 12a y 12b se muestran los diagramas de tiempo de la señal de salida. Los experimentos se realizaron en dos muestras diferentes y en tiempos distintos, así que las sensibilidades y amplitudes de modulación varían de un experimento a otro. Una inyección de una solución de glicerina muy concentrada (44 % vol. y 1,39 de índice de refracción) causó un fuerte cambio de fase y oscilaciones  $18\pi$  (véase figura 12a). Una inyección de una solución de glicerina poco concentrada (2,2% o 3,3% vol. con índices de refracción de 1,3356 y 1,337, respectivamente) dieron como resultado cambios de fase débiles y oscilaciones de casi  $\pi$  y  $2\pi$ , respectivamente (véase figura 12b).

Al analizar los resultados de los experimentos y tomar como índice de refracción del agua desionizada de 1,333, se observó un cambio de fase de aproximadamente  $2\pi$  radianes por cambio de  $0,006$  RIU en el revestimiento. La pendiente de la curva en la posición de máxima sensibilidad es aproximadamente  $0,06$  por  $10^{-4}$  RIU. Posteriormente, para detectar la variación de índice  $10^{-6}$  RIU es necesaria una precisión de  $6 \times 10^{-4}$  (0,06%) al medir el valor absoluto de la señal de salida. La estabilidad de la señal de salida ha de ser del mismo orden de magnitud. Para una ventana de detección de 10 mm de longitud, la sensibilidad es de  $0,002$  por cambio de  $10^{-6}$  RIU. A pesar de que existen discrepancias entre las sensibilidades predichas teóricamente y las demostradas experimentalmente, se deben a la técnica de acoplamiento utilizada en el experimento, que no siempre garantiza la

relación de amplitud apropiada entre los modos excitados. En otras palabras, la discrepancia es una consecuencia de las limitaciones ingenieriles.

La presente invención proporciona, además, un procedimiento para detectar la introducción de cambios (ej. la cantidad o concentración de un estímulo) en un estímulo químico, biológico o físico de interés en un entorno localizado. El procedimiento comprende los siguientes pasos, llevados a cabo en un interferómetro de guía de onda óptica bimodal como el representado en las figuras 1a, 1b y 1c:

- a) definir una ventana de detección 21 31 41 en una zona seleccionada de la parte superior de la guía de onda 10, 20, 30, 40;
- b) colocar un estímulo químico, biológico o físico, o analito en dicha ventana de detección 21, 31, 41;
- c) introducir o causar cambios en dicho estímulo químico, biológico o físico en dicha ventana de detección 21, 31, 41;
- d) acoplar un modo fundamental y un modo de orden primero de radiación electromagnética en dicha guía de onda óptica 10, 20, 30, 40, de forma que cuando ambos modos viajan a través de la ventana de detección 21, 31, 41, definida en la guía de onda, se produce una variación en sus características, como un retardo de fase que depende de los cambios dados en dicho estímulo químico, físico o biológico.
- e) medir la respuesta de dicho modo fundamental, a la salida de dicha guía de onda, en relación a la respuesta de dicho modo de orden primero; y
- f) relacionar dicha respuesta relativa de ambos modos con los cambios dados en el estímulo químico, biológico o físico.

Preferiblemente, el paso (e) comprende, además:

- (e1) generar un patrón de franjas de interferencias; y
- (e2) medir un desplazamiento en el patrón de interferencia.

Preferiblemente, el paso (f) comprende, además:

- (f1) relacionar el desplazamiento del patrón de interferencia con la presencia de cambios en el estímulo químico, biológico o físico de interés.

Como conclusión, se presenta un diseño simple de un interferómetro y un sensor basados en una guía de onda óptica bimodal.

En este texto, el término "comprende" y sus derivaciones (tales como "que comprende" etc.) no debe entenderse de modo excluyente, es decir, éstos términos no deben interpretarse de modo que excluyan la posibilidad de que todo lo descrito y definido pueda incluir más elementos, pasos etc.

En el contexto de la presente invención, los términos "alrededor", "unos/unas", "aproximadamente" y "sustancialmente" y los términos de la misma familia (como "aproximado" etc.) deben interpretarse como indicadores de valores muy próximos a aquellos que acompañan el término al que anteceden. Es decir, una desviación de un valor exacto debe aceptarse, dentro de límites razonables, pues el experto en la materia entenderá que tal desviación de los valores indicados es inevitable debido a imprecisiones de medición, etc.

Por otra parte, es obvio que la invención no se limita a la(s) realización(es) específicas aquí descritas, sino que también abarca cualquier variación que pudiese considerar el experto en la materia (por ejemplo, en lo referente a elección de materiales, dimensiones, componentes, configuración, etc.), dentro del ámbito general de la invención como se especifica en las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) que comprende:

- un sustrato (8, 28, 38, 48);
- 5 – una guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40) que comprende al menos una capa (1, 2, 3) depositada en dicho sustrato (8, 28, 38, 48), estando dicha guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40) diseñada para soportar un modo de orden cero y un modo de orden primero de propagación transversal, teniendo dichos modos de propagación transversal diferente dispersión, en el que dicha guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40) comprende, además, un medio de confinamiento (9), diseñado para confinar la luz en dirección lateral, estando la guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40) diseñada así para soportar un modo lateral;
- 10 – una zona de detección (21, 31, 41, 51) situada en una zona seleccionada de la parte superior de dicha guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40), estando dicha zona de detección (21, 31, 41, 51) configurada para recibir un estímulo de entrada químico, biológico o físico, siendo dicho estímulo capaz de cambiar el índice de refracción efectivo de dicha guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40);
- 15 – medios de detección (27, 27', 37, 47) para medir en la salida de dicha guía de onda, cambios en la intensidad de radiación debidos a dicho estímulo de entrada

**caracterizado porque** dicho medio de detección es un fotodetector de dos secciones, comprendiendo, además, el interferómetro, medios para registrar de forma simultánea tanto la energía total, como el cambio de distribución de la luz que sale de la guía de onda bimodal usando dicho fotodetector de dos secciones.

20 2. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según la reivindicación 1, que comprende, además, una fuente de radiación electromagnética (4, 4') configurada para conducir la luz óptica a dicha guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40).

3. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según la reivindicación 2, en el que dicha fuente de radiación electromagnética (4, 4') es un láser.

25 4. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según la reivindicación 2, en el que dicha fuente de radiación electromagnética está integrada en la estructura del sustrato (8, 28, 38, 48).

5. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según cualquier reivindicación anterior, que comprende, además, medios de polarización.

30 6. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según cualquier reivindicación anterior, que comprende, además, medios de enfoque.

7. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25) según la reivindicación 6, en el que dichos medios de enfoque son una lente (22, 52).

35 8. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25) según la reivindicación 7, en el que el eje central de dicha lente (22, 52) está configurado para desalinearse en dirección transversal con respecto al eje de simetría longitudinal de la guía de onda bimodal (20, 20'), excitándose de esta forma un primero y segundo modos de propagación transversal dentro de la guía de onda bimodal (20, 20') cuando la luz procedente de una fuente se enfoca directamente a través de dicha lente hacia la guía de onda bimodal (20, 20').

9. Interferómetro de guía de onda óptica plana (35) según cualquier reivindicación de la 1 a la 5, que comprende, además:

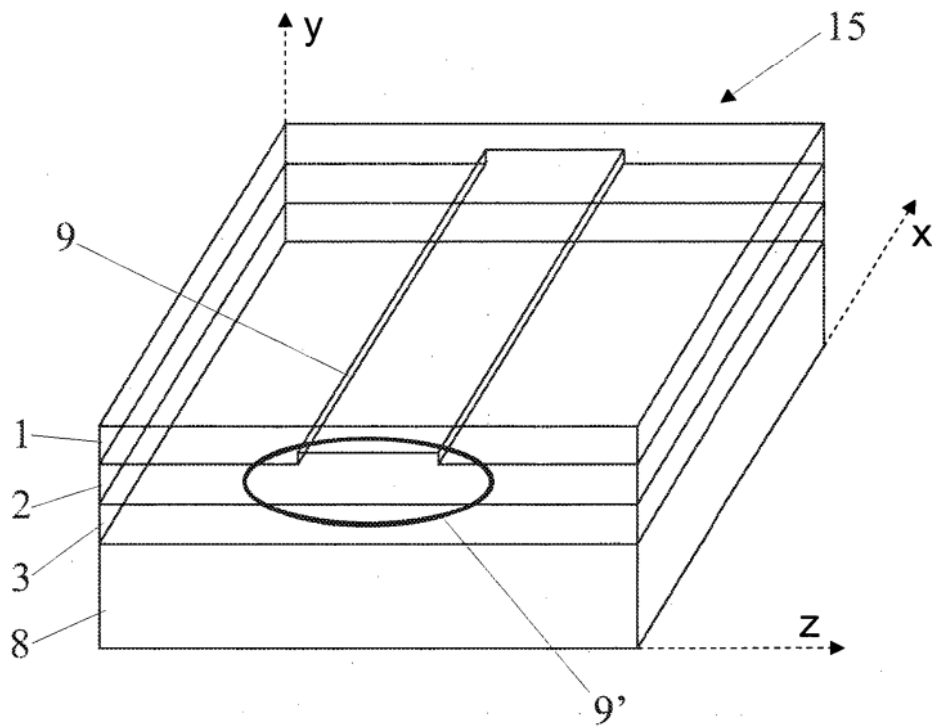
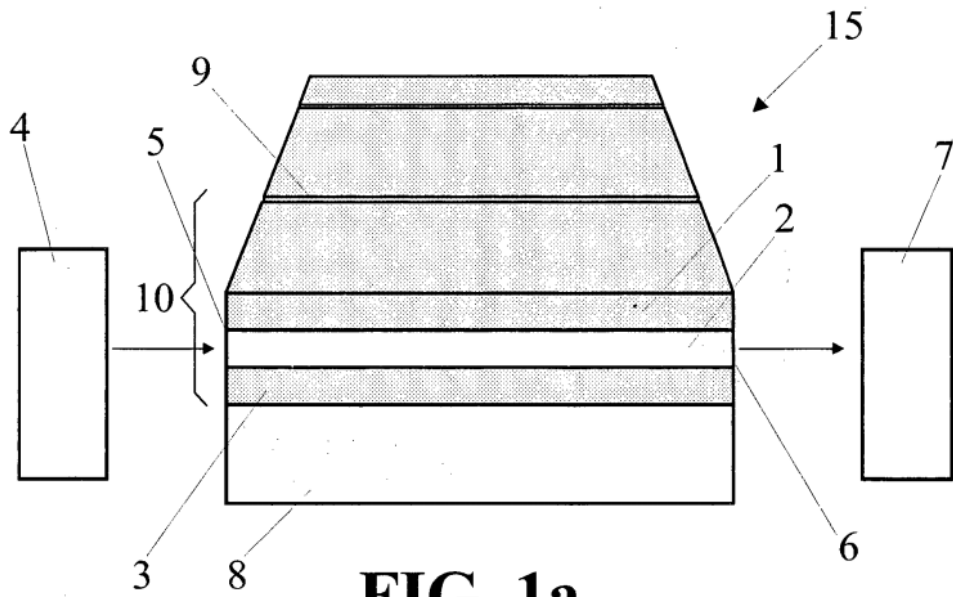
- 40 - una guía de onda de entrada (32) conectada a un extremo de dicha guía de onda bimodal (30), estando diseñada dicha guía de onda de entrada (32) para soportar un mono modo en dirección tanto transversal como lateral;
- una guía de onda de salida (33) conectada al otro extremo de dicha guía de onda bimodal (30), estando dicha guía de onda de salida (33) diseñada para soportar un mono modo en dirección tanto transversal como lateral;
- 45 en el que el grosor cada una de dichas guías de onda de entrada y salida (32, 33) es menor que el de dicha guía de onda bimodal (30), de manera que debido a la geometría asimétrica de la estructura en la intersección de dicha guía de onda de entrada (32) y dicha guía de onda bimodal (30), dicho mono modo se divide en dichos modos primero y segundo de propagación transversal.

10. Interferómetro de guía de onda óptica plana (35) según la reivindicación 9, que comprende, además, medios para acoplar radiación electromagnética dentro de dicha guía de onda bimodal (30), en el que dichos medios se seleccionan del grupo formado por: radiación longitudinal, enfoque directo, acoplamiento por prisma y acoplamiento por red de difracción.
- 5 11. Interferómetro de guía de onda óptica plana (35) según la reivindicación 9 o 10, en el que la cantidad de luz acoplada en la guía de onda de salida (33) depende de la distribución de intensidad existente en la intersección entre la guía de onda bimodal (30) y la guía de onda de salida (33).
- 10 12. Interferómetro de guía de onda óptica plana (45) según cualquier reivindicación de la 1 a 5, que comprende, además, medios de acoplamiento (42) diseñados para acoplar a dicha guía de onda bimodal (40) un modo de luz de orden cero y un modo de orden primero con diferentes ángulos de incidencia ( $\theta_0$ ,  $\theta_1$ ).
13. Interferómetro de guía de onda óptica plana (45) según la reivindicación 12, en el que dicho medio de acoplamiento (42) es una red de difracción acoplada a una entrada de dicha guía de onda bimodal (40).
14. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según cualquier reivindicación anterior, en el que dicha guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40) comprende al menos dos capas.
- 15 15. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según la reivindicación 14, en el que la primera capa de la guía de onda posee un primer índice de refracción y la segunda capa de la guía de onda posee un segundo índice de refracción; siendo el índice de refracción de dicha segunda capa menor que el de dicha primera capa de la guía de onda.
- 20 16. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según cualquier reivindicación anterior, en el que el índice de refracción efectivo de dicho modo de orden cero y el índice de refracción efectivo de dicho modo de orden primero son sustancialmente diferentes.
17. Interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según cualquier reivindicación anterior, en el que dicha diferencia de dispersión de los modos de propagación transversal depende de la velocidad de propagación en los parámetros de dicha guía de onda.
- 25 18. Chip que comprende al menos un interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según cualquier reivindicación anterior.
19. Sensor que comprende un interferómetro de guía de onda óptica plana (15, 25, 35, 45) según cualquier reivindicación de 1 a 17.
20. Procedimiento de detección que comprende los siguientes pasos:
- 30 a) definir una zona de detección (21, 31, 41, 51) en una zona seleccionada de la guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40) de un interferómetro de guía de onda óptica (15, 25, 35, 45);
- b) colocar un estímulo químico, biológico o físico en dicha zona de detección (21, 31, 41, 51);
- c) introducir o causar cambios en dicho estímulo químico, biológico o físico, situado en dicha zona de detección (21, 31, 41, 51);
- 35 d) acoplar un modo de orden cero y un modo de orden primero de radiación electromagnética dentro de dicha guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40), de forma que cuando ambos modos se desplazan a través de dicha zona de detección (21, 31, 41, 51) definida en dicha guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40), sufren un retardo de fase que depende de los cambios en dicho estímulo químico, biológico o físico;
- 40 e) medir, en la salida de dicha guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40), la respuesta de dicho modo de orden cero en relación a la respuesta de dicho modo de orden primero; y
- 45 f) relacionar dicha respuesta relativa de ambos modos con los cambios en el estímulo químico, biológico o físico, **caracterizándose** el procedimiento **porque** dicho paso (e) de medir la respuesta de dicho modo de orden cero en relación a la respuesta de dicho modo de orden primero en la salida de dicha guía de onda bimodal (10, 20, 20', 30, 40) se lleva a cabo usando un fotodetector de dos secciones (47) para registrar de forma simultánea tanto la potencia total, como el cambio de distribución de la luz que sale de la guía de onda bimodal.
21. Procedimiento de detección según la reivindicación 20, en el que el paso de medir la respuesta de dicho modo de orden cero en relación a la respuesta de dicho modo de orden primero comprende:

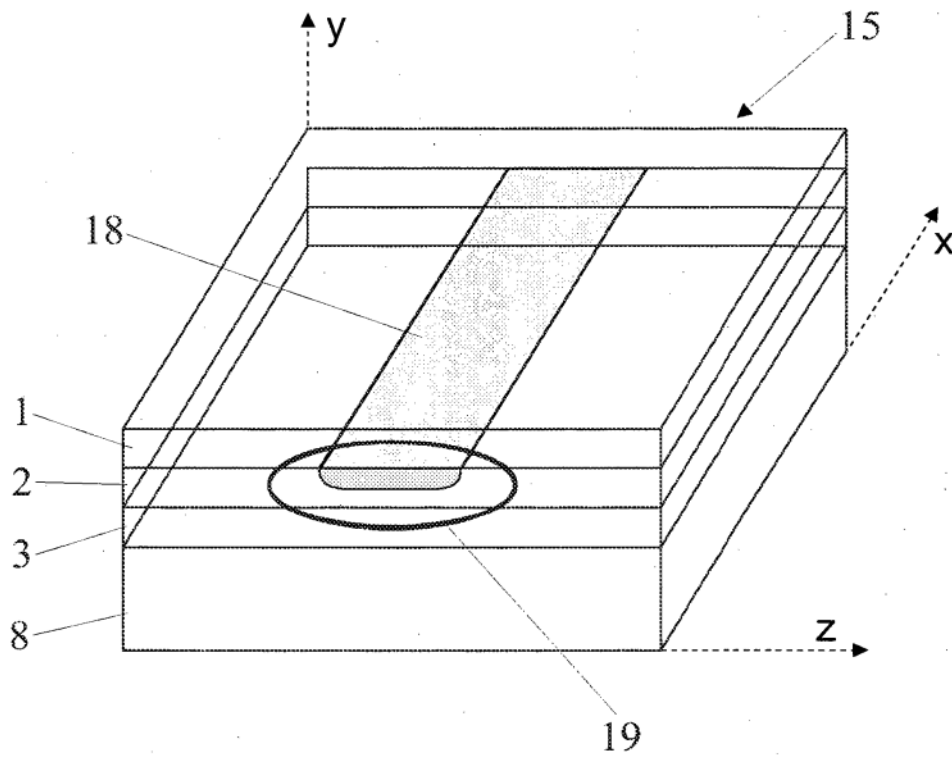
- generar un patrón de franjas de interferencias (11, 12, 13); y
- medir un desplazamiento en el patrón de interferencia (11, 12, 13).

22. Procedimiento de detección según la reivindicación 21, en el que el paso de relacionar dicha respuesta relativa de ambos modos con los cambios dados en el estímulo químico, biológico o físico comprende, además:

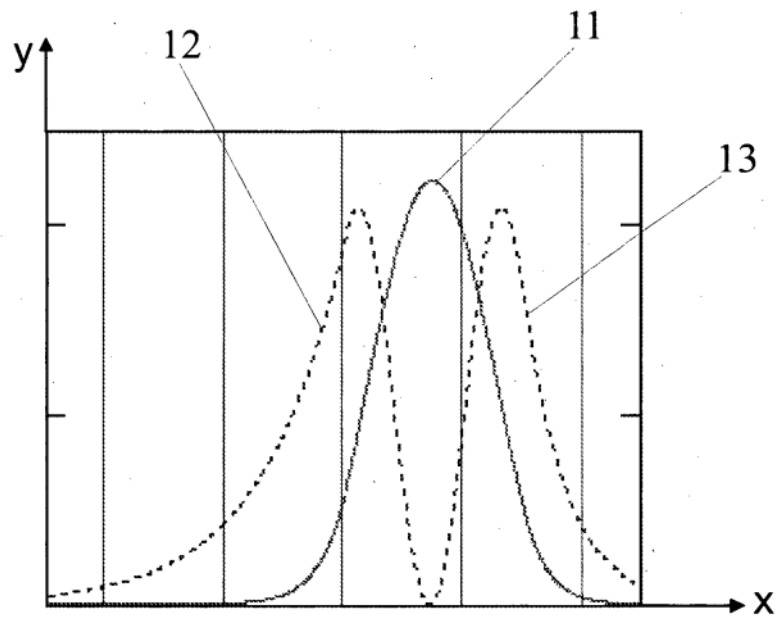
- 5
- relacionar dicho desplazamiento del patrón de interferencia con la presencia de cambios en el estímulo químico, biológico o físico de interés.



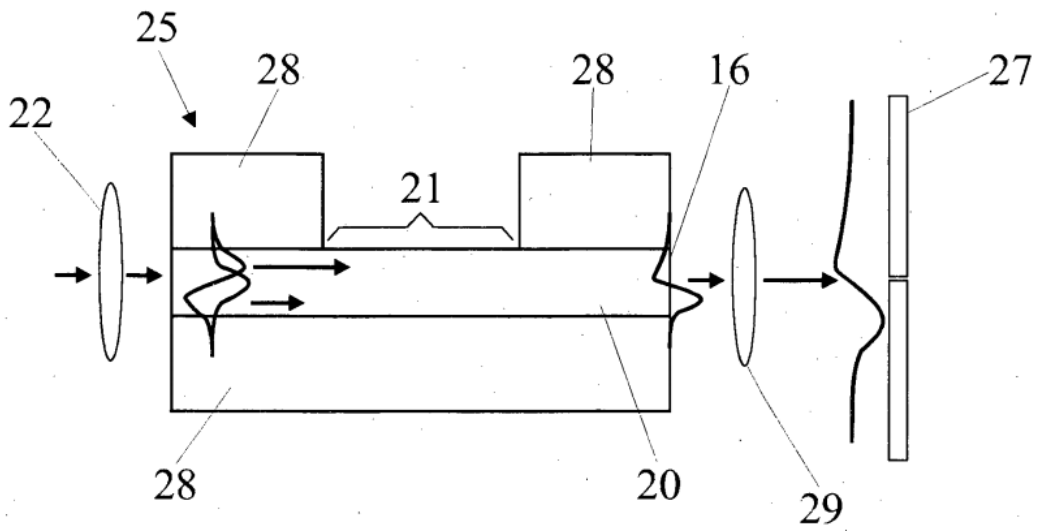




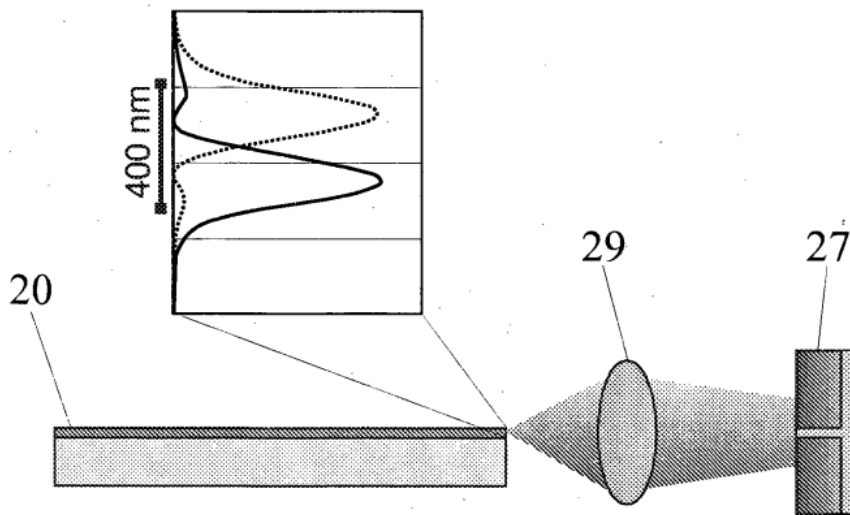
**FIG. 1c**



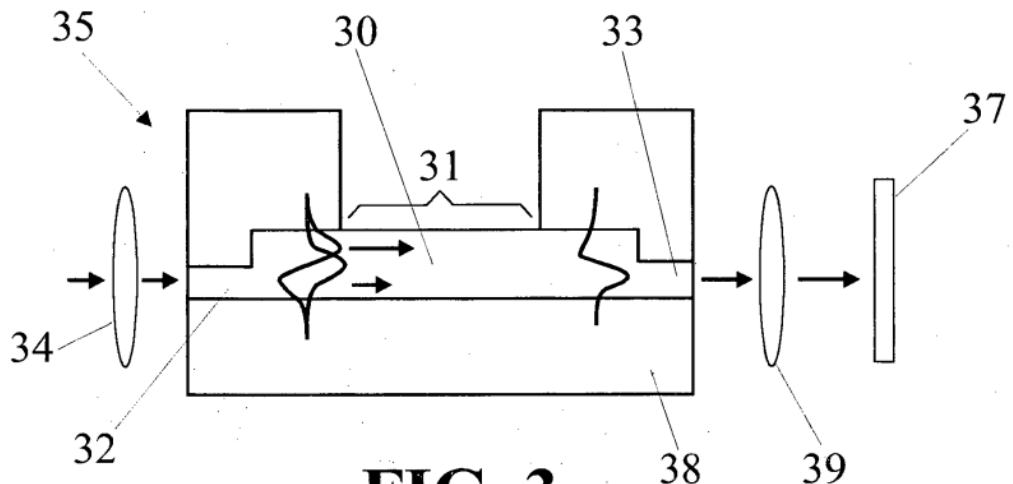
**FIG. 1d**



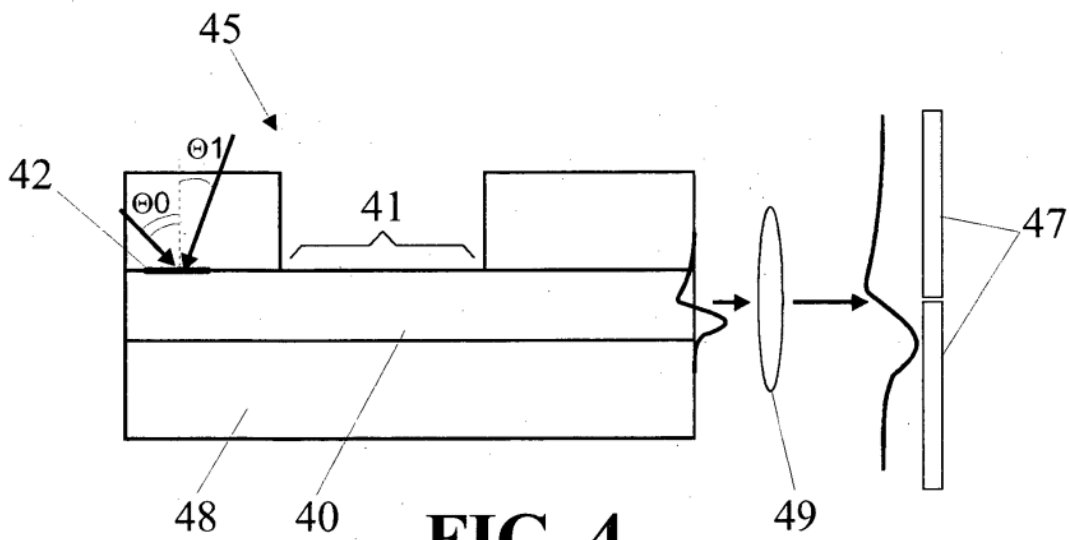
**FIG. 2a**



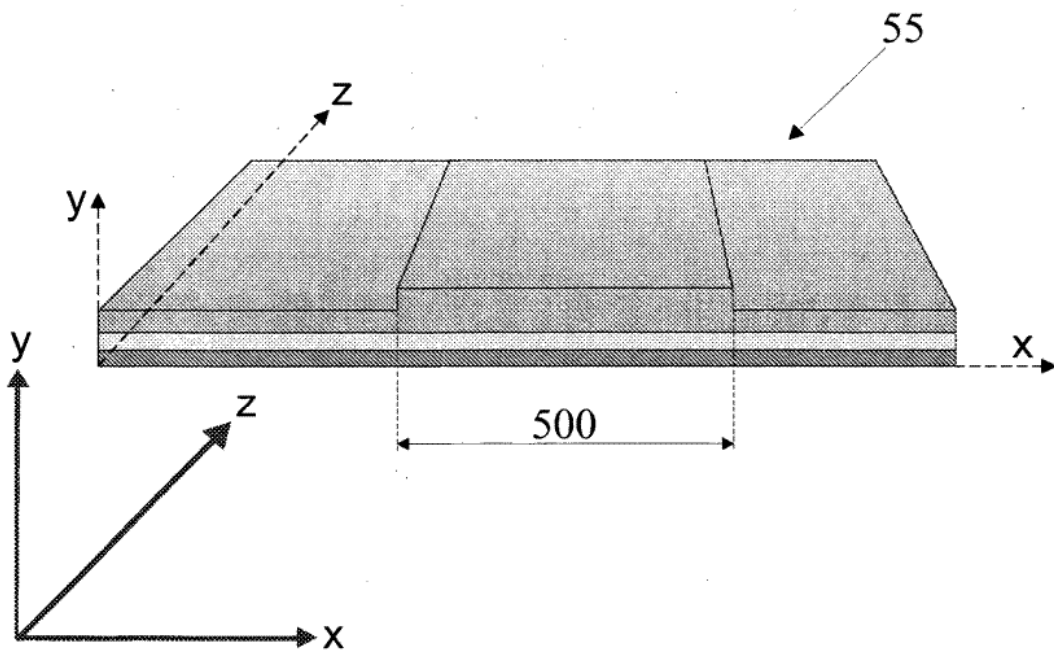
**FIG. 2b**



**FIG. 3**

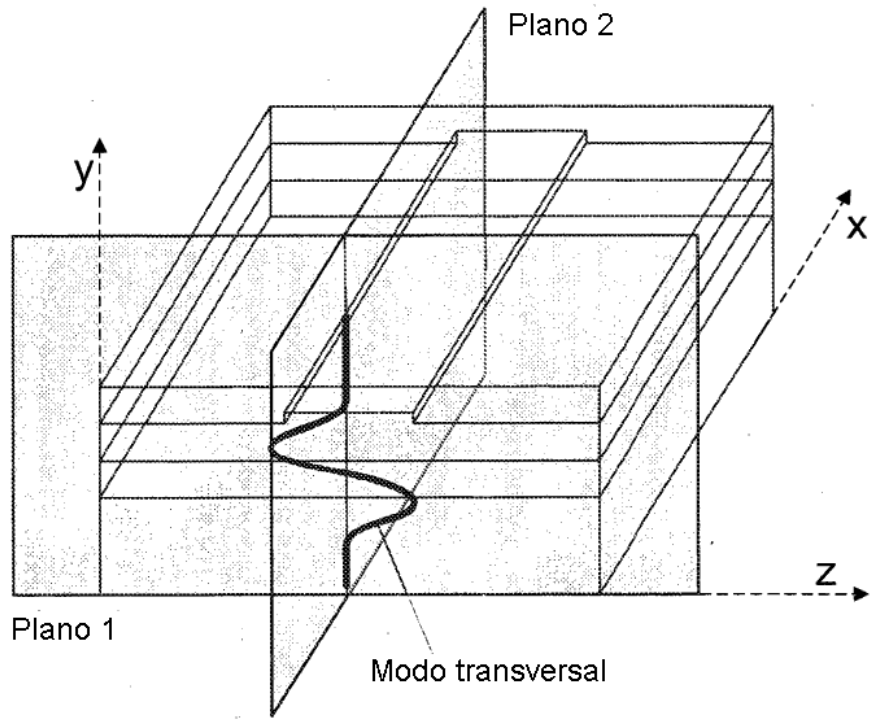


**FIG. 4**

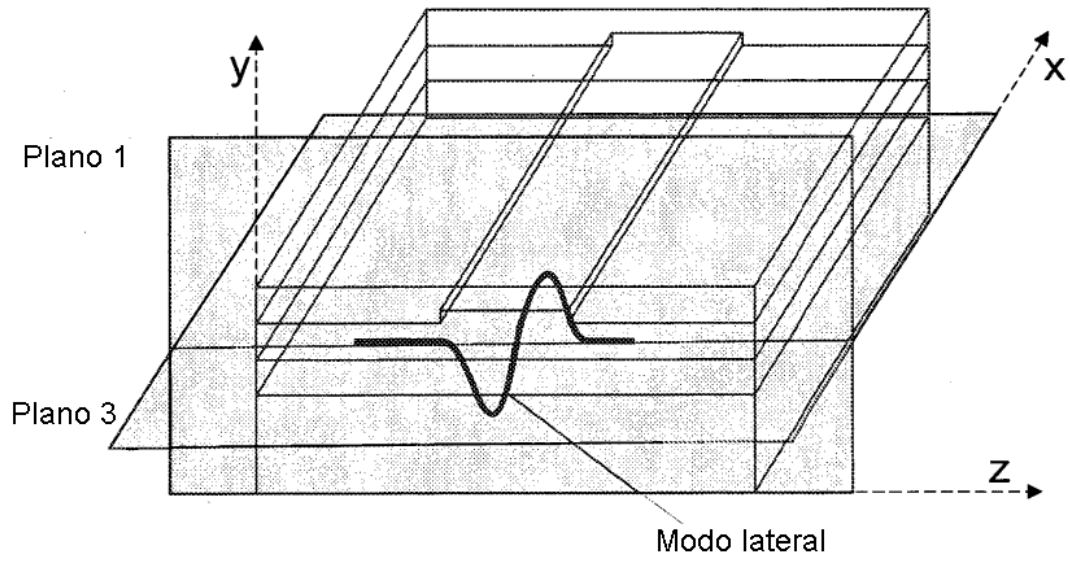


(Técnica anterior)

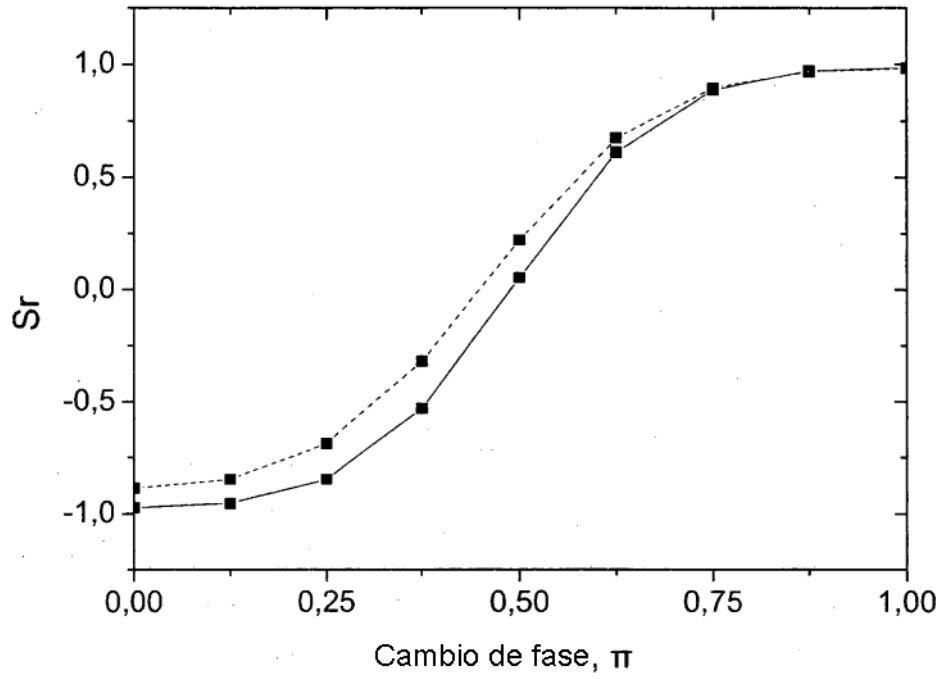
**FIG. 5**



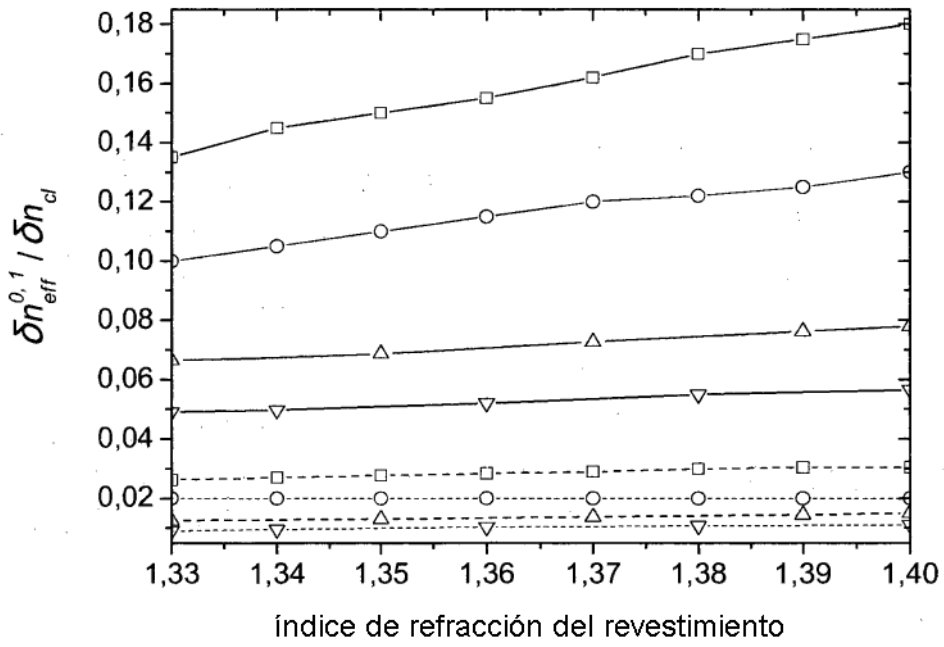
**FIG. 6**



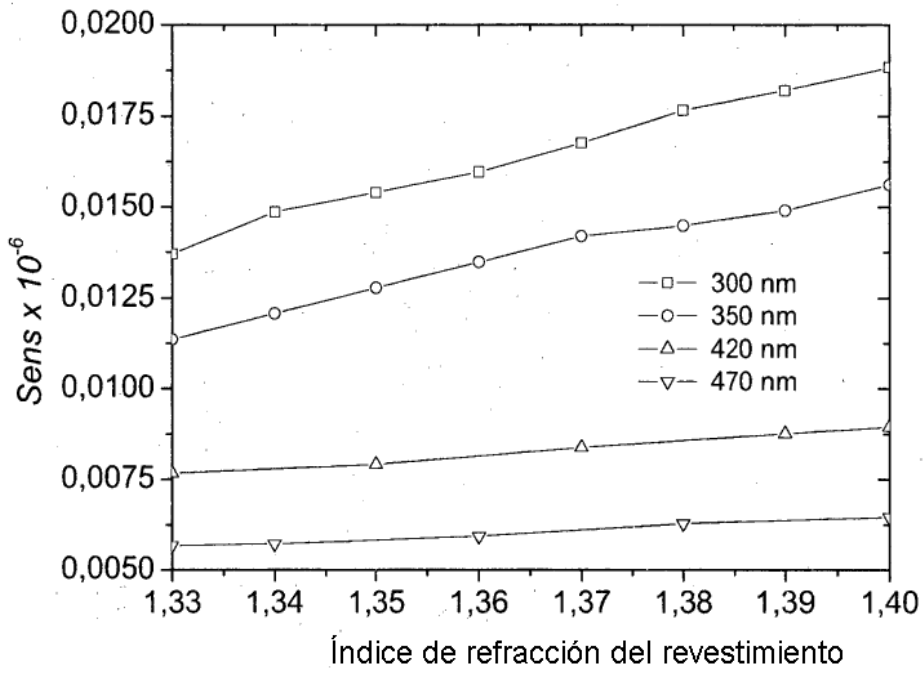
**FIG. 7**



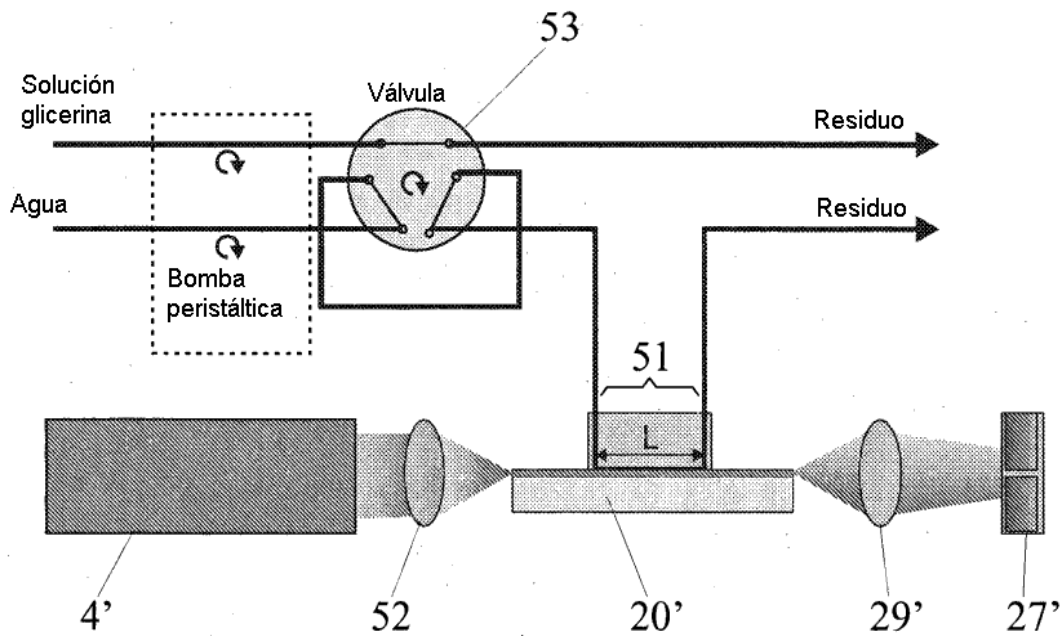
**FIG. 8**



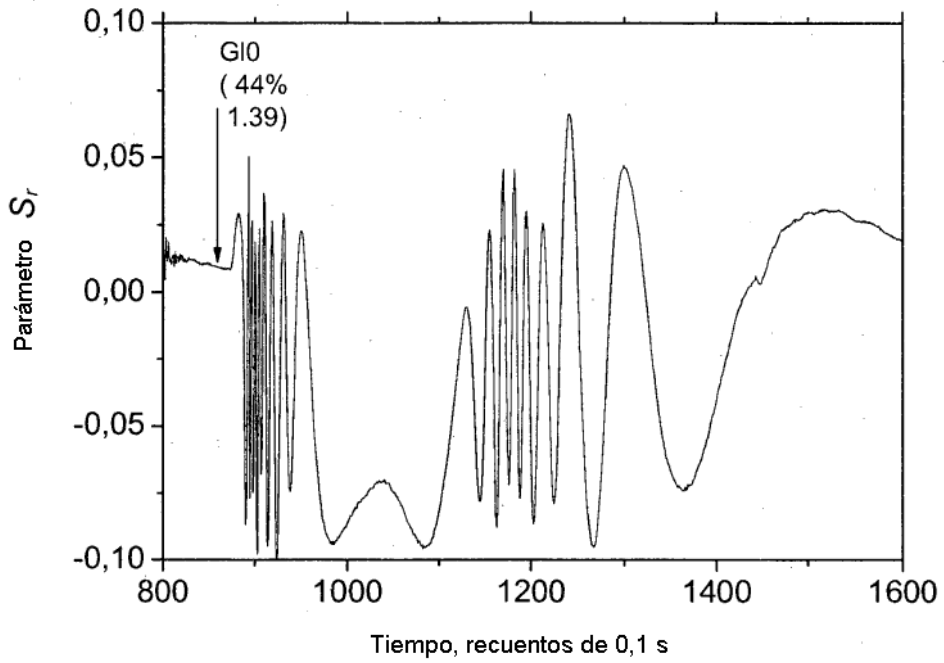
**FIG. 9**



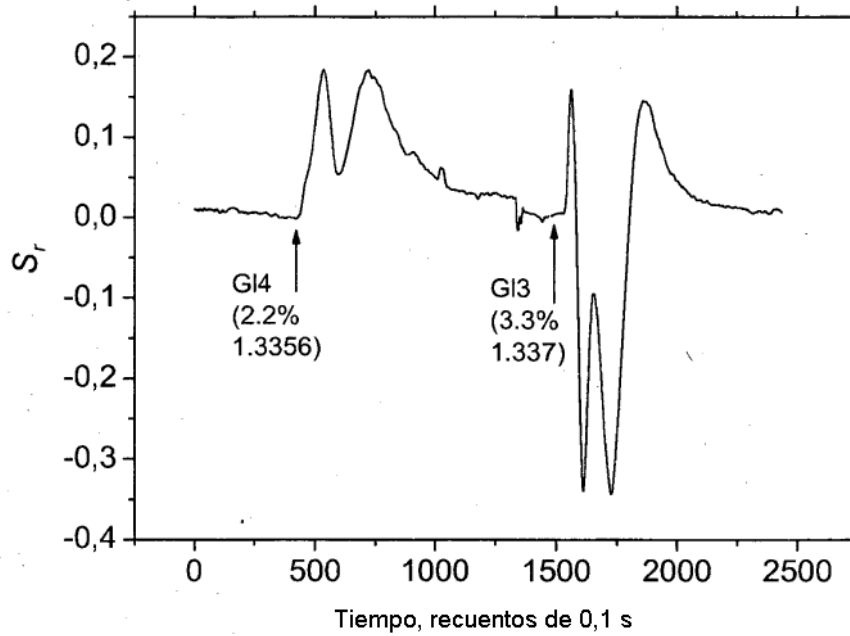
**FIG. 10**



**FIG. 11**



**FIG. 12a**



**FIG. 12b**