

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 396 391**

21 Número de solicitud: 201131088

51 Int. Cl.:

G01J 9/02 (2006.01)

A61B 5/00 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

28.06.2011

43 Fecha de publicación de la solicitud:

21.02.2013

71 Solicitantes:

MEDLUMICS, S.L. (100.0%)

C/ de La Hoya, 2

39400 Los Corrales de Buelna (Cantabria) ES

72 Inventor/es:

RUBIO GUIVERNAU, José Luis y

MARGALLO BALBÁS, Eduardo

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

54 Título: **DISPOSITIVO DE RETARDO ÓPTICO VARIABLE PARA INTERFEROMETRÍA DE BAJA COHERENCIA.**

57 Resumen:

Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, que se comunica mediante ondas electromagnéticas con un sistema de interferometría de baja coherencia, que comprende al menos un elemento de retardo variable (2) que comprende un segmento de guía de onda (1) que realiza una pluralidad de recorridos a lo largo de al menos una zona de índice de refracción controlable (3); y unos medios variadores (5) que varían el fasor de las ondas electromagnéticas, procedentes de la comunicación con el sistema de interferometría de baja coherencia y conducidas por la guía de onda (1) comprendida en cada elemento de retardo variable (2), de forma independiente para cada modo de polarización.

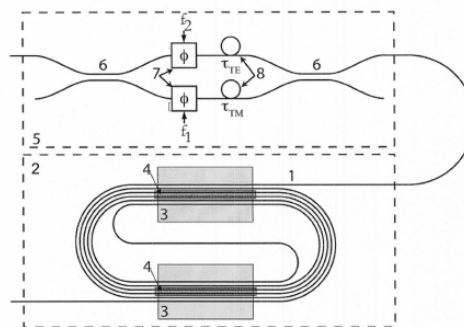


Fig. 12

DESCRIPCIÓN

Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia.

Campo de la invención

5 La presente invención se engloba dentro del campo de la interferometría de baja coherencia. La exposición se centra en una de sus aplicaciones más conocidas, la tomografía de coherencia óptica, capaz de generar imágenes (2D) y representaciones volumétricas (3D) de la histología de un tejido objeto de estudio. Concretamente la invención trata de un dispositivo de retardo óptico variable integrado utilizable en sistemas de tomografía de coherencia óptica en el dominio del tiempo (TD-OCT, Time Domain-Optical Coherence Tomography).

Antecedentes de la invención

10 La tomografía de coherencia óptica (OCT, por sus siglas en inglés Optical Coherence Tomography) es una técnica de generación de imágenes médicas capaz de proporcionar información axial de alta resolución utilizando una fuente de luz de banda ancha y un sistema de detección interferométrico. Ha encontrado un amplio rango de usos, desde oftalmología y cardiología hasta ginecología o el estudio de material biológico con alta resolución.

15 Uno de los elementos necesarios para un sistema de OCT en el dominio del tiempo (TD-OCT) es la línea de retardo variable, que hace posible el barrido en profundidad de la muestra.

Existen en la literatura de patentes ejemplos de invenciones que tratan acerca de cómo construir líneas de retardo que proporcionen un rango de variación del retardo suficiente para su uso en OCT y una alta velocidad de barrido. Por ejemplo la solicitud de patente EP 0831312 describe un dispositivo basado en fibra óptica y un piezoeléctrico para su uso como línea de retardo variable en OCT.

20 No obstante, las implementaciones de líneas de retardo variable basadas en elementos mecánicos ven limitada su máxima velocidad de operación por el hecho de tener partes móviles y por la inercia de las mismas. Recientemente se ha descrito ("Thermo-optical delay line for optical coherence tomography" E. Margallo-Balbás, G. Pandraud, and P.J. French, Proc. SPIE 6717, 671704 (2007), "Miniature 10 kHz thermo-optic delay line in silicon" E. Margallo-Balbás, M. Geljon, Grégory Pandraud, and P. J. French, Opt. Lett. 35 (23). pp. 4027-4029 (2010) y otros artículos de los mismos autores) una implementación de este elemento mediante óptica integrada aprovechando el efecto termo-óptico del silicio, lo que abre la puerta al desarrollo de sistemas TD-OCT totalmente integrados.

25 El efecto termo-óptico consiste en la variación de los índices de refracción de fase y grupo de un material con su temperatura. La relación entre la variación de temperatura y la del índice de refracción se conoce como coeficiente termo-óptico. Por ejemplo, el del silicio para 1.3µm a temperatura ambiente es $2.4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Esto quiere decir que para conseguir una variación en el camino óptico de 1mm es necesario elevar la temperatura de un segmento de guía de onda de 1 cm en torno a 417K.

30 Sin embargo, para una tecnología de fabricación dada, existe un compromiso entre la longitud de la guía de onda sujeta a acción térmica, la potencia aplicada, el retardo máximo (que determina la profundidad máxima de barrido) y la frecuencia máxima de los ciclos térmicos (que determina la velocidad del barrido). Este compromiso implica una elección en el diseño térmico que queda fijada una vez elegido un proceso de producción.

35 Además del efecto termo-óptico, existen otros efectos que afectan al índice de refracción del material y que son comúnmente utilizados en óptica integrada para la producción de elementos activos, como el efecto electro-óptico o los efectos de inyección de carga. Dichos efectos presentan problemas análogos respecto a los medios para efectuar la modificación del índice de refracción en el área recorrida por las guías.

40 En la solicitud de patente US 20090022443 se describe una forma de aliviar el compromiso mencionado anteriormente, la cual consiste en hacer que un segmento de guía de onda pase varias veces por una zona cuyo índice de refracción es controlable mediante la variación de su temperatura.

45 En la descripción de dicha solicitud de patente (US 20090022443) se hace énfasis en la importancia del diseño de las curvas del segmento de guía de onda, necesarias para que dicho segmento pase varias veces por la zona de índice de refracción controlable, mencionando el posible problema de las pérdidas por propagación dependientes del radio de curvatura de la guía. Sin embargo no se mencionan otros problemas asociados a la curvatura de las guías de onda, especialmente en sus implementaciones mediante óptica planar, como es la aparición de birrefringencia, es decir velocidad de propagación distinta para cada polarización de la onda luminosa, que se han descrito en la literatura para este tipo de estructuras (A. Melloni et al., "Determination of Bend Mode Characteristics in Dielectric Waveguides", J. Lightwave Technol., vol. 19(4), pp. 571-577, 2001).

50 Existen otras aplicaciones del efecto termo-óptico en dispositivos de óptica integrada. Por ejemplo en la solicitud de patente US 20050084195 se describe un dispositivo para aprovechar el efecto termo-óptico, entre otros, para controlar la guía de onda de un cristal fotónico, mediante dos contactos eléctricos próximos a dicha guía de onda.

Otro ejemplo es la solicitud de patente JP 2009162933, que describe un dispositivo óptico para su empleo, por ejemplo, en interferómetros Mach-Zender que hace uso del efecto termo-óptico para introducir desplazamientos de fase, y que tiene como principal característica la forma de colocar los contactos eléctricos respecto a la guía de onda para evitar problemas debidos a la birrefringencia que podría aparecer con otros esquemas de cableado de los contactos eléctricos.

También existen ejemplos de artículos ("Step-type optical delay line using silica-based planar light-wave circuit (PLC) technology", I. Kobayashi and K. Koruda, IEEE Instrumentation and Measurement, 1998 y "Wide-bandwidth continuously tunable optical delay line using silicon microring resonators", J. Cardenas et al., Opt. Express 18, 26525-26534, 2010) en los que el efecto termo-óptico es utilizado para crear líneas de retardo basadas en óptica integrada. En ambos casos sin embargo, al ser el campo de aplicación diferente y por tanto los criterios de diseño también, el rango espectral libre (Free Spectral Range o FSR) es varios órdenes de magnitud inferior al requerido en OCT. En el primer artículo, de I. Kobayashi y K. Koruda, existe un compromiso entre el FSR y el retardo máximo, de forma que para retardos de alrededor de 2mm como los necesarios para OCT el dispositivo presenta un FSR de aproximadamente 150GHz. En el segundo artículo, de J. Cardenas et al., el FSR es de 10GHz. Ambos están como hemos mencionado varios órdenes de magnitud por debajo de las decenas de THz necesarias para OCT (por ejemplo para $\lambda = 1300nm$ y una fuente de luz con $\Delta\lambda = 60nm$ de ancho de banda, el FSR necesario es de $c \cdot \Delta\lambda / \lambda^2 = 10.6THz$).

Es claro por tanto el interés existente en dispositivos de retardo variable que aprovechen efectos como el termo-óptico, u otros efectos utilizados en óptica integrada para modificar el índice de refracción como son el eléctrico-óptico o el de inyección de carga. Cómo se ha mencionado anteriormente, en el diseño de este tipo de dispositivos existe un compromiso entre la longitud de la guía de onda sujeta a acción térmica (en el caso de utilizar el efecto termo-óptico), la potencia aplicada, el retardo máximo (que determina la profundidad máxima de barrido cuando se utiliza este dispositivo en un sistema OCT) y la frecuencia máxima de los ciclos térmicos (que determina la velocidad del barrido).

Sin embargo no existe en la literatura ningún dispositivo que permita aliviar este compromiso mediante la reutilización de una zona de índice de refracción controlable, y que al mismo tiempo dé solución al problema de la birrefringencia inherente a las curvas que necesariamente ha de seguir la guía de onda para llevar a cabo dicha reutilización. El problema de la birrefringencia puede no ser crítico en otras aplicaciones, pero en sistemas interferométricos como es el caso de OCT si es crítico ya que induce imágenes dobles o pérdida de resolución en las imágenes adquiridas.

Descripción de la invención

Esta invención presenta una solución que supera la limitación anteriormente descrita, de forma que en aplicaciones en las que existan restricciones a la potencia máxima aplicable o al tamaño máximo del dispositivo, puede lograrse una mayor profundidad de barrido, una mayor velocidad de barrido o la combinación de ambas.

Para ello se hace pasar un segmento de guía de onda varias veces por al menos una zona de índice de refracción controlable mediante un cambio de temperatura de forma activa, reutilizándose así el calor generado por elementos calefactores.

Esta reutilización lleva pareja la aparición de birrefringencia asociada a la curvatura de las guías, que induce imágenes dobles o pérdida de resolución en OCT. Para combatirla, la invención comprende mecanismos que individualizan o ajustan las contribuciones de cada modo de polarización a la señal de interferencia, minimizando los inconvenientes citados.

La invención describe distintas técnicas para permitir la individualización de los dos modos de polarización en el post-procesado de la señal, como son la modulación en fase, amplitud o frecuencia de las señales correspondientes a las dos polarizaciones distintas, la supresión de uno de los modos de polarización, la alternancia temporal de los mismos, o su separación en el dominio de la coherencia.

La modulación en fase, amplitud o frecuencia de las señales correspondientes a cada modo de polarización se obtiene actuando de forma separada sobre cada modo de polarización, bien sea sobre la fase o sobre la amplitud, es decir, sobre el fasor de la onda electromagnética. La modulación óptica tiene su correspondencia en la señal de interferencia que se obtenga en el sistema de interferometría de baja coherencia en que se integre esta invención, pudiéndose separar la información de cada modo de polarización mediante el uso de técnicas de filtrado y demodulación.

La supresión de uno de los modos de polarización elimina cualquier problema de imagen doble, pero pierde información. Otra opción es la alternancia temporal de cada uno de ellos, de modo que en cada momento la señal de interferencia del sistema en que se integre la invención se corresponda a uno sólo de ellos. La separación de la información de cada modo puede realizarse sincronizando la señal de interferencia con el ritmo de alternancia de los modos.

Finalmente, la separación en el dominio de la coherencia consiste en la introducción de una diferencia de retraso de grupo controlada entre las polarizaciones, de modo que en cada momento solamente un modo de polarización produzca interferencia significativa en el detector del sistema de interferometría de baja coherencia en que se integre la invención, usándose un elemento de retraso variable en el dispositivo que permita cubrir los rangos de retraso de grupo de las dos polarizaciones.

Alternativamente, para evitar los efectos de imagen doble o pérdida de resolución, la invención muestra cómo ecualizar los retardos de grupo correspondientes a cada polarización actuando por separado sobre los retardos de cada polarización. Una forma de lograr esto es mediante la separación física de cada modo de polarización en caminos físicos distintos, cuya longitud se ajusta para lograr el efecto citado.

La gestión de la birrefringencia puede ser realizada de forma conjunta con el dispositivo de retardo, o en otra parte del sistema interferométrico en el caso de que el sistema que incorpore el dispositivo de retardo mantenga la polarización.

El dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, que se comunica mediante ondas electromagnéticas con un sistema de interferometría de baja coherencia, comprende:

- al menos un elemento de retardo variable que comprende un segmento de guía de onda que realiza una pluralidad de recorridos a lo largo de al menos una zona de índice de refracción controlable;
- unos medios variadores que varían el fasor de las ondas electromagnéticas, procedentes de la comunicación con el sistema de interferometría de baja coherencia y conducidas por la guía de onda comprendida en cada elemento de retardo variable, de forma independiente para cada modo de polarización.

Preferentemente, la zona de índice de refracción controlable es una zona de temperatura controlable por medio de al menos un elemento calefactor y está realizada en un material termo-óptico.

En otra realización preferente, la zona de índice de refracción controlable es una zona de campo eléctrico controlable mediante electrodos y está realizada en un material electro-óptico.

En otra realización preferente, la zona de índice de refracción controlable es una zona de concentración de portadores de carga controlable mediante electrodos y está realizada en un material cuyo índice de refracción depende de la concentración de portadores de carga.

De forma preferente, los medios variadores pueden comprender unos medios de separación de las polarizaciones que separan los dos modos de polarización de la onda electromagnética conducida por la guía de onda de cada elemento de retardo variable.

Preferentemente, los medios variadores pueden comprender unos medios moduladores que aplican una modulación a la onda electromagnética que circula por ellos. Los medios moduladores aplican una modulación preferentemente seleccionada entre:

- modulación en fase;
- modulación en amplitud.

De forma preferente, los medios variadores comprenderán unos medios de multiplexado temporal que multiplexan en el tiempo los modos de polarización de la onda electromagnética conducida por la guía de onda de cada elemento de retardo variable mediante la supresión sustantiva de cada modo de polarización alternativamente.

De forma preferente, los medios variadores pueden comprender elementos de retardo de grupo constantes y distintos para cada modo de polarización de la onda electromagnética conducida por la guía de onda de cada elemento de retardo variable. Adicionalmente, los elementos de retardo de grupo pueden estar configurados para introducir retardos que reduzcan sustancialmente la diferencia de retardo resultante entre las dos polarizaciones. En otra realización los elementos de retardo de grupo pueden introducir adicionalmente una diferencia de retardo entre polarizaciones mayor que el retardo correspondiente al rango de barrido en profundidad del sistema de interferometría de baja coherencia del que forma parte.

Los medios variadores pueden comprender unos medios para absorber la energía óptica que supriman sustancialmente un modo de polarización de la onda electromagnética conducida por la guía de onda de cada elemento de retardo variable.

Los medios variadores pueden estar separados del elemento de retardo variable.

El sistema de tomografía de coherencia óptica con retardo óptico variable, comprende un dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, que además comprende:

- una fuente de luz de baja coherencia;
- un acoplador direccional que divide la luz procedente de la fuente de luz de baja coherencia dirigiéndola al brazo de referencia y al brazo de muestreo y que obtiene la interferencia óptica mediante la luz que retorna por los dos brazos tras ser dispersada por la muestra;
- 5 • una óptica de enfoque situada en el brazo de muestreo que barre lateralmente la muestra y que recoge la luz dispersada por la muestra enviándola al acoplador direccional;
- un elemento reflector que envía la luz a través del dispositivo de retardo variable hacia el acoplador direccional;
- el detector que recibe la interferencia óptica del acoplador direccional y la transforma en una señal eléctrica;
- 10 • un sistema de procesamiento de señal y visualización que recibe la señal eléctrica del detector configurado para procesar y mostrar dicha señal eléctrica.

El sistema de tomografía de coherencia óptica con retardo óptico variable, comprende un dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, que además comprende:

- una fuente de luz de baja coherencia;
- 15 • un acoplador direccional que divide la luz procedente de la fuente de luz de baja coherencia dirigiéndola al brazo de referencia y al brazo de muestreo y que obtiene la interferencia óptica mediante la luz que retorna por los dos brazos tras ser dispersada por la muestra;
- una óptica de enfoque situada en el brazo de muestreo que barre lateralmente la muestra y que recoge la luz dispersada por la muestra enviándola a través del elemento de retardo variable hacia el acoplador
- 20 direccional;
- un elemento reflector que envía la luz a través de los medios variadores hacia el acoplador direccional;
- el detector que recibe la interferencia óptica del acoplador direccional y la transforma en una señal eléctrica;
- un sistema de procesamiento de señal y visualización que recibe la señal eléctrica del detector configurado para procesar y mostrar dicha señal eléctrica.

25 **Breve descripción de los dibujos**

A continuación se pasa a describir de manera muy breve una serie de dibujos que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

30 La Figura 1 muestra una realización del elemento de retardo variable para una potencia y tamaño fijos, con una zona de índice de refracción controlable de forma térmica, que es atravesada tres veces por una guía de onda.

La Figura 2 muestra una sección de la zona de índice de refracción controlable de forma térmica del elemento de retardo variable atravesada tres veces por la guía de onda y basada en una membrana suspendida fabricada usando técnicas de microfabricación de volumen.

35 La Figura 3 muestra una sección de la zona de índice de refracción controlable de forma térmica del elemento de retardo variable atravesada tres veces por la guía de onda y basada en una membrana suspendida fabricada usando técnicas de microfabricación de superficie.

40 La Figura 4 muestra otra realización del elemento de retardo variable para una potencia y tamaño fijos, con dos zonas de índice de refracción controlable de forma térmica que son recorridas alternativamente por la guía de onda varias veces.

La Figura 5 muestra otra realización del elemento de retardo variable para una potencia y tamaño fijos, con una zona de índice de refracción controlable de forma térmica y continua a lo largo de la guía de onda comprendida en el elemento de retardo variable.

45 La Figura 6 muestra el desajuste de las señales correspondientes a los dos modos de polarización en presencia de birrefringencia del material y/o de las guías de onda.

La Figura 7 muestra la separación de las dos polarizaciones combinada con su multiplexado mediante modulación en fase y la introducción de retardos de grupo independientes para cada modo de polarización.

La Figura 8 muestra la fase introducida por un modulador de fase lineal con el objetivo de desplazar en frecuencia el espectro de cada polarización en el batido de interferencia recogido en el detector.

La Figura 9 muestra unos medios para la separación de los dos modos de polarización combinados con un multiplexado temporal obtenido mediante un conmutador óptico.

5 La Figura 10 muestra unos medios para la separación de los dos modos de polarización combinados con unos medios moduladores para la separación en frecuencia de las contribuciones a la señal de interferencia y un conmutador óptico para obtener un multiplexado temporal.

La Figura 11 muestra la separación de las dos polarizaciones combinada con la supresión de una de ellas mediante un elemento de absorción de la energía óptica.

10 La Figura 12 muestra una realización del dispositivo de retardo variable con trazado múltiple sobre dos zonas de temperatura controlable y con gestión de la birrefringencia mediante separación en frecuencia de las polarizaciones y ajuste de los rangos de barrido axial de los dos posibles estados de polarización.

15 La Figura 13 muestra una realización del dispositivo de retardo variable con gestión de la birrefringencia mediante separación física de los dos modos de polarización, que son modulados en fase de forma independiente y recorren elementos de retardo distintos usando dos trazados independientes con recorridos múltiples sobre dos zonas de temperatura controlable distintas.

20 La Figura 14 muestra una realización del dispositivo de retardo variable con gestión de la birrefringencia mediante separación física de los dos modos de polarización, que son modulados en fase de forma independiente, ven ajustado su retardo de grupo mediante elementos de retardo fijo diferentes y recorren elementos de retardo variable distintos usando dos trazados separados con recorridos múltiples sobre dos zonas de temperatura controlable distintas.

25 La figura 15 muestra una configuración básica de un sistema de tomografía de coherencia óptica que incorpora el dispositivo de retardo variable. Además se muestran una fuente de baja coherencia, un detector, un acoplador direccional, un sistema de procesado de señal y visualización y la óptica de enfoque, que barre el haz de luz lateralmente sobre la muestra.

La figura 16 muestra otra configuración básica de un sistema de tomografía de coherencia óptica que incorpora el dispositivo de retardo variable. Se observa que el elemento de retardo está situado en un brazo diferente del interferómetro que los medios variadores de los fasores de onda.

Descripción detallada de un modo de realización

30 En la figura 1 se muestra una posible configuración del elemento de retardo variable 2 en la que se hace pasar la guía de onda 1 tres veces por la zona de índice de refracción controlable 3, que en este caso es rectangular y cuyo índice de refracción se hace variar de forma térmica, controlando la temperatura mediante el elemento calefactor 4. De esta forma, se reutiliza el calor generado por el elemento calefactor 4. La disposición de la guía de onda 1 logra multiplicar la variación del camino óptico térmicamente inducida para una potencia dada y un tamaño fijo de la zona de índice de refracción controlable 3 mediante cambio de temperatura.

35 La figura 2 muestra una sección del elemento de retardo variable 2 representado en planta en la figura 1. En la figura se observan tres guías de onda 1 con resalte y un elemento calefactor 4 cruzando la zona índice de refracción controlable 3 mediante cambio de temperatura, que está configurada como una membrana suspendida fabricada mediante técnicas de microfabricación de volumen. Esta configuración física de la zona de índice de refracción controlable 3 mediante cambio de temperatura sirve para aumentar la resistencia térmica al sustrato y así minimizar la potencia disipada necesaria para controlar la temperatura con el fin de alcanzar un determinado cambio en el índice de refracción. Claramente, son posibles otras configuraciones físicas que conduzcan al mismo efecto.

40 La figura 3 muestra una sección del elemento de retardo variable 2 representado en planta en la figura 1. En este caso, la zona de índice de refracción controlable 3 mediante cambio de temperatura está configurada como una membrana suspendida fabricada mediante técnicas de microfabricación de superficie. En la figura también se aprecian las secciones de los tres segmentos de guía de onda 1 y del elemento calefactor 4.

La figura 4 muestra otra configuración del elemento de retardo variable 2 en la que se aprecian dos zonas de índice de refracción controlable 3 de forma térmica mediante elementos calefactores 4, y a través de las cuáles se traza varias veces la guía de onda 1 comprendida en el elemento de retardo variable 2.

50 La figura 5 muestra un último ejemplo de configuración del elemento de retardo variable 2 en la que la zona de índice de refracción controlable 3 mediante cambio de temperatura y el elemento calefactor 4 acompañan a la guía de onda 1 a lo largo de su recorrido.

En todas estas configuraciones, así como en otras equivalentes que no alteren el principio fundamental y la esencia de la invención, el incremento del aprovechamiento de la zona de índice de refracción controlable 3 va

asociado necesariamente al hecho de que la guía de onda 1 realice curvas, o incluso describa una curva continua como es el caso de la configuración de la figura 5. Por tanto, para implementar el dispositivo de retardo variable en un tamaño reducido, es necesario que algunos segmentos de la guía de onda 1 presenten una curvatura importante, lo que provoca la aparición de birrefringencia significativa en dichos segmentos.

5 La birrefringencia es un problema típico en los dispositivos basados en óptica integrada, y consiste en la dependencia con la polarización de las velocidades de fase y grupo en las guías de onda. En el caso de sistemas de tomografía de coherencia óptica, esta dependencia puede causar un desplazamiento relativo de los patrones de interferencia de las dos polarizaciones, dando como resultado neto una pérdida de resolución axial, o incluso imágenes dobles. La figura 6 ilustra el efecto de la birrefringencia sobre el desajuste entre las señales OCT,
10 expresado como $c \Delta \tau$, recogidas en el detector y correspondientes a los dos modos de polarización en las guías de onda 1 usadas para construir el dispositivo de retardo variable. La gráfica superior muestra la señal correspondiente al modo (quasi)TE y la gráfica inferior la señal correspondiente al modo (quasi)TM. Para resolver este problema, la presente invención incluye un sistema de gestión de la birrefringencia.

15 En la mayor parte de los casos, las soluciones a la birrefringencia pasan por la optimización de la tecnología de guías de onda para disminuirla, bien por la cancelación de la birrefringencia mediante la elección de una geometría correcta para las guías, bien mediante la aplicación de un nivel de tensión controlado a las guías mediante la deposición de capas de materiales como el dióxido de silicio, que ajusten las velocidades de grupo y fase de ambas polarizaciones.

20 Aunque estas soluciones son apropiadas en muchos casos, complican el proceso de fabricación y su eficacia depende de las tolerancias en la deposición de las capas involucradas. Además, no compensan la birrefringencia introducida por segmentos de guía de onda 1 con fuerte curvatura.

25 Para solucionar este problema, el dispositivo de retardo variable comprende unos medios variadores 5 de los fasores de onda que actúan de forma independiente para cada polarización. En una posible implementación, dichos medios variadores 5 comprenden la combinación de medios de separación de polarizaciones 6, que separan las polarizaciones mediante un acoplador sensible a la polarización, seguidos de unos medios de multiplexado para permitir la separación de las señales de interferencias recogidas en el detector del sistema en que se integre la invención.

30 En sistemas con detección interferométrica, como es el caso en OCT, el multiplexado puede ser obtenido mediante la introducción de una modulación en fase que produzca un multiplexado en frecuencia en el batido de interferencia en el detector. La figura 7 muestra los medios de separación de las polarizaciones 6 que separan los dos modos de polarización (quasi)TE y (quasi)TM mediante un acoplador dependiente de la polarización. Cada modo de polarización pasa a través de unos medios moduladores 7; en este caso, a través de un modulador de fase. Para una configuración del interferómetro en que la luz recorra el dispositivo de retardo dos veces, el control de la fase del modulador sería preferentemente lineal, con una señal en diente de sierra entre 0 y π y con periodo T_1 resultando en un desplazamiento en frecuencia en el batido de interferencia, siendo $f_1=1/T_1$ la magnitud de este desplazamiento. Este tipo de modulación de fase está representado en la figura 8. Eligiendo las frecuencias de modulación para cada modo de polarización suficientemente separadas se puede conseguir que no haya interferencia entre los espectros correspondientes a los dos modos de polarización.

40 Independientemente de la modulación, pueden introducirse elementos de retardo de grupo 8 distintos en cada rama mediante, por ejemplo, una longitud física diferente, para evitar que los rangos de barrido axial del sistema en que se integra la invención se desajusten entre polarizaciones. Esto puede ser deseable en casos en que la birrefringencia lleve a diferencias de retardo de grupo comparables con el rango de barrido del sistema OCT, para asegurar que ambas polarizaciones quedan dentro del rango accesible por el dispositivo de retardo variable.

45 Alternativamente, se puede introducir elementos de retardo de grupo 8 distintos en cada rama, no con el objetivo de ajustar la birrefringencia, sino con el fin de separar espacialmente las señales de interferencia de las mismas y que el barrido axial para ambas polarizaciones suceda de forma secuencial a lo largo de un ciclo de barrido del dispositivo de retardo variable. Para ello es necesario que la diferencia de retardo de grupo entre polarizaciones sea mayor que el rango de profundidades de la muestra desde el que se reciben señales en el sistema en que se integra la invención y suficientemente pequeña para que el barrido de ambos modos de
50 polarización ocurra dentro del rango del dispositivo de retardo variable.

Otras técnicas de multiplexado distintas de la modulación en frecuencia, como división en el dominio del código, tiempo, u otras, serían también aplicables a los medios multiplexores incluidos en medios variadores 5 de los fasores de onda, con las ventajas e inconvenientes de cada uno. En el caso particular de la modulación en el dominio del tiempo, es necesario suprimir, por ejemplo mediante un conmutador óptico, una de las dos
55 polarizaciones alternativamente. Esto conlleva una pérdida de potencia óptica y posiblemente una penalización en términos de relación señal a ruido.

La figura 9 muestra un ejemplo de implementación en que unos medios de separación de las polarizaciones 6, basados en un acoplador direccional sensible a la polarización, están conectados a unos medios de multiplexado

temporal 9 implementados mediante un conmutador óptico, que alterna entre los dos modos de polarización. En la figura 10 se han añadido unos medios moduladores 7 que introducen una modulación en fase que resulta en un desplazamiento en frecuencia de la señal de interferencia en el sistema de interferometría de baja coherencia en que se integre la invención. Estos elementos moduladores buscan minimizar la interferencia de la polarización inactiva debida a conmutadores ópticos no ideales mediante multiplexado en frecuencia.

Otra implementación posible de los medios variadores 5 del fasor de onda de cada polarización de forma independiente es aquella que simplemente suprime una de las polarizaciones. Aunque esta alternativa conlleva una pérdida de información y de potencia óptica, logra evitar los problemas de doble imagen o pérdida de resolución de la birrefringencia. La figura 11 muestra una combinación de unos medios de separación de las polarizaciones 6 con unos medios para absorber la energía óptica 10 del modo de polarización no deseado.

En un sistema de OCT integrado, la separación de las dos polarizaciones en frecuencia puede hacerse o bien en el brazo de referencia o en el de muestreo, para que la modulación en fase introducida aparezca en el batido como fase diferencial y sea efectiva. En esta invención, de forma preferente, los medios variadores 5 del fasor de onda de cada polarización de forma independiente se incluirán junto con el elemento de retardo para producir un único dispositivo libre de los inconvenientes de la birrefringencia. Sin embargo, otras implementaciones son posibles en que los medios variadores 5 del fasor de onda de cada polarización de forma independiente no son adyacentes a la guía de onda 1 comprendida en el elemento de retardo variable 2.

La figura 12 muestra una posible integración de los medios variadores 5 del fasor de onda de cada polarización de forma independiente junto con un elemento de retardo variable 2, en el dispositivo de retardo variable. El elemento de retardo variable 2 mostrado consiste de una guía de onda 1 con trazado múltiple sobre las zonas de índice de refracción controlable 3 de forma térmica y de los elementos calefactores 4. Asimismo, los medios variadores 5 consisten de unos medios de separación de las polarizaciones 6, de unos medios moduladores 7 y unos elementos de retardo de grupo 8, y realizan un control activo de la birrefringencia mediante separación en frecuencia de las polarizaciones y ajuste de los rangos de barrido axial de los dos posibles estados de polarización.

La figura 13 muestra una realización del dispositivo de retardo variable en la que se gestiona el problema de la birrefringencia mediante separación física de los modos de polarización mediante unos medios de separación de las polarizaciones 6. Estos modos de polarización son entonces modulados en fase de forma independiente por unos medios moduladores 7 y cada uno recorre un elemento de retardo variable 2 distinto. En cada elemento de retardo variable 2, las guías de onda 1 pueden entonces hacer recorridos múltiples sobre las respectivas zonas de índice de refracción controlable 3 usando dos trazados independientes sin problemas de imagen doble. El hecho de utilizar elementos de retardo variable 2 separados duplica la potencia disipada por el dispositivo, pero aumenta la flexibilidad en el diseño, en el caso, por ejemplo en que se desee frecuencias o profundidades de barrido diferentes para cada modo de polarización.

En la implementación representada en la figura 14 se ha añadido, respecto a la de la figura 13, elementos de retardo de grupo 8 para cada modo de polarización, con el fin de poder elegir los rangos axiales de barrido de forma independiente para cada modo de polarización.

La figura 15 muestra una configuración básica de un sistema de tomografía de coherencia óptica que incorpora el dispositivo de retardo variable. La luz procedente de la fuente de baja coherencia 101 se divide mediante el acoplador direccional 103 en dos brazos, uno de referencia y otro de muestreo. El brazo de muestreo está conectado a una óptica de enfoque 105, que barre el haz de luz 106 lateralmente sobre la muestra. La luz dispersada por la muestra es recogida de nuevo por la óptica de enfoque 105 y enviada de vuelta al acoplador direccional 103. La luz del brazo de referencia alcanza primero el dispositivo de retardo variable y luego un elemento reflector 107 que envía la luz de vuelta a través del dispositivo de retardo variable hacia el acoplador direccional 103. El acoplador direccional 103 mezcla la luz en retorno de los dos brazos y envía parte de la misma hacia un detector 102, que transforma el batido de interferencia óptica en una salida eléctrica, que es enviada a su vez a un sistema de procesado de señal y visualización 104.

La figura 16 muestra otra configuración básica de un sistema de tomografía de coherencia óptica que incorpora el dispositivo de retardo variable. La luz procedente de la fuente de baja coherencia 101 se divide mediante el acoplador direccional 103 en dos brazos, uno de referencia y otro de muestreo. La luz dirigida al brazo de muestreo atraviesa en primer lugar el elemento de retardo variable 2 para a continuación llegar a una óptica de enfoque 105, que barre el haz de luz 106 lateralmente sobre la muestra. La luz dispersada por la muestra es recogida de nuevo por la óptica de enfoque 105 y enviada de vuelta al acoplador direccional 103. La luz del brazo de referencia atraviesa en primer lugar los medios variadores 5 del fasor de onda para después llegar a un elemento reflector 107 que envía la luz de vuelta a través los medios variadores 5 hacia el acoplador direccional 103. Para que esta configuración sea válida es necesario que el interferómetro mantenga el estado de polarización entre sus dos ramas.

Una vez descrita de forma clara la invención, se hace constar que las realizaciones particulares anteriormente descritas son susceptibles de modificaciones de detalle siempre que no alteren el principio fundamental y la esencia de la invención.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, que se comunica mediante ondas electromagnéticas con un sistema de interferometría de baja coherencia, caracterizado por que comprende:
- 5 • al menos un elemento de retardo variable (2) que comprende un segmento de guía de onda (1) que realiza una pluralidad de recorridos a lo largo de al menos una zona de índice de refracción controlable (3);
- 10 • unos medios variadores (5) que varían el fasor de las ondas electromagnéticas, procedentes de la comunicación con el sistema de interferometría de baja coherencia y conducidas por la guía de onda (1) comprendida en cada elemento de retardo variable (2), de forma independiente para cada modo de polarización.
2. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según la reivindicación 1, caracterizado por que la zona de índice de refracción controlable (3) es una zona de temperatura controlable por medio de al menos un elemento calefactor (4) y está realizada en un material termo-óptico.
- 15 3. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según la reivindicación 1, caracterizado por que la zona de índice de refracción controlable (3) es una zona de campo eléctrico controlable mediante electrodos y está realizada en un material electro-óptico.
- 20 4. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según la reivindicación 1, caracterizado por que la zona de índice de refracción controlable (3) es una zona de concentración de portadores de carga controlable mediante electrodos y está realizada en un material cuyo índice de refracción depende de la concentración de portadores de carga.
- 25 5. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los medios variadores (5) comprenden unos medios de separación de las polarizaciones (6) que separan los dos modos de polarización de la onda electromagnética conducida por la guía de onda (1) de cada elemento de retardo variable (2).
- 30 6. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los medios variadores (5) comprenden unos medios moduladores (7) que aplican una modulación a la onda electromagnética que circula por ellos.
- 30 7. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según la reivindicación 6, caracterizado por que los medios moduladores (7) aplican una modulación seleccionada entre:
- modulación en fase;
- modulación en amplitud.
- 35 8. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los medios variadores (5) comprenden unos medios de multiplexado temporal (9) que multiplexan en el tiempo los modos de polarización de la onda electromagnética conducida por la guía de onda (1) de cada elemento de retardo variable (2) mediante la supresión sustantiva de cada modo de polarización alternativamente.
- 40 9. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los medios variadores (5) comprenden elementos de retardo de grupo (8) constantes y distintos para cada modo de polarización de la onda electromagnética conducida por la guía de onda (1) de cada elemento de retardo variable (2).
- 45 10. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según la reivindicación 9, caracterizado por que los elementos de retardo de grupo (8) están configurados para introducir retardos que reduzcan sustancialmente la diferencia de retardo resultante entre las dos polarizaciones.
- 50 11. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según la reivindicación 9, caracterizado por que los elementos de retardo de grupo (8) introducen una diferencia de retardo entre polarizaciones mayor que el retardo correspondiente al rango de barrido en profundidad del sistema de interferometría de baja coherencia del que forma parte.
- 50 12. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los medios variadores (5) comprenden unos medios para absorber la energía óptica (10) que suprimen sustancialmente un modo de polarización de la onda electromagnética conducida por la guía de onda (1) de cada elemento de retardo variable (2).

13. Dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los medios variadores (5) están separados del elemento de retardo variable (2).

5 14. Sistema de tomografía de coherencia óptica con retardo óptico variable, caracterizado por que comprende un dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, y además comprende:

- una fuente de luz de baja coherencia (101);
- un acoplador direccional (103) que divide la luz procedente de la fuente de luz de baja coherencia (101) dirigiéndola al brazo de referencia y al brazo de muestreo y que obtiene la interferencia óptica mediante la luz que retorna por los dos brazos tras ser dispersada por la muestra;
- una óptica de enfoque (105) situada en el brazo de muestreo que barre lateralmente la muestra y que recoge la luz dispersada por la muestra enviándola al acoplador direccional (103);
- un elemento reflector (107) que envía la luz a través del dispositivo de retardo variable hacia el acoplador direccional (103);
- el detector (102) que recibe la interferencia óptica del acoplador direccional (103) y la transforma en una señal eléctrica;
- un sistema de procesamiento de señal y visualización (104) que recibe la señal eléctrica del detector (102) configurado para procesar y mostrar dicha señal eléctrica.

15 20 15. Sistema de tomografía de coherencia óptica con retardo óptico variable, caracterizado por que comprende un dispositivo de retardo óptico variable para interferometría de baja coherencia, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, y además comprende:

- una fuente de luz de baja coherencia (101);
- un acoplador direccional (103) que divide la luz procedente de la fuente de luz de baja coherencia (101) dirigiéndola al brazo de referencia y al brazo de muestreo y que obtiene la interferencia óptica mediante la luz que retorna por los dos brazos tras ser dispersada por la muestra;
- una óptica de enfoque (105) situada en el brazo de muestreo que barre lateralmente la muestra y que recoge la luz dispersada por la muestra enviándola a través del elemento de retardo variable (2) hacia el acoplador direccional (103);
- un elemento reflector (107) que envía la luz a través de los medios variadores (5) hacia el acoplador direccional (103);
- el detector (102) que recibe la interferencia óptica del acoplador direccional (103) y la transforma en una señal eléctrica;
- un sistema de procesamiento de señal y visualización (104) que recibe la señal eléctrica del detector (102) configurado para procesar y mostrar dicha señal eléctrica.

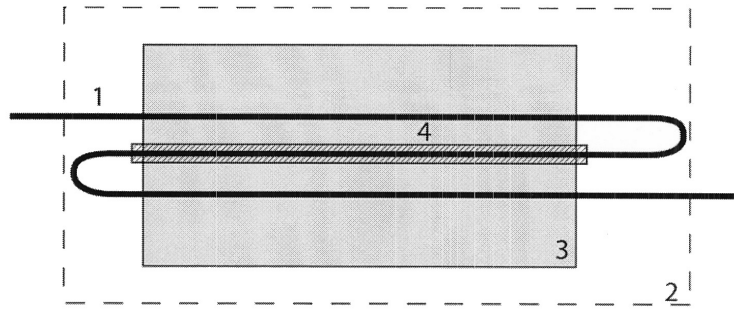


Fig. 1

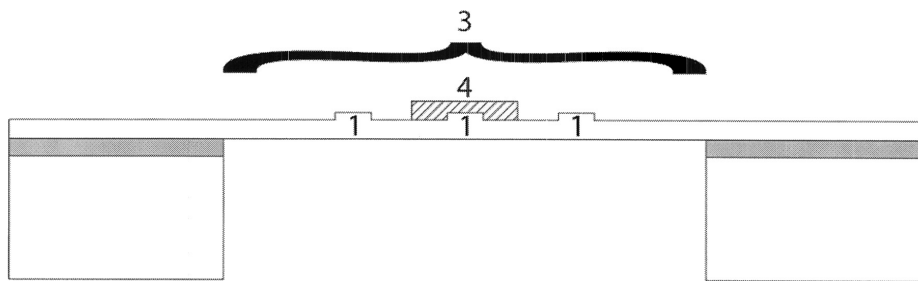


Fig. 2

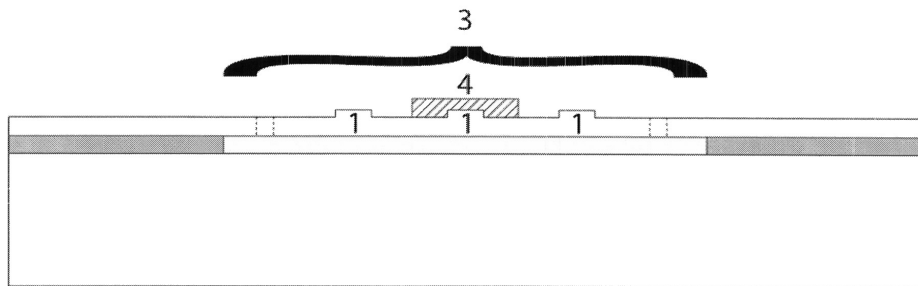


Fig. 3

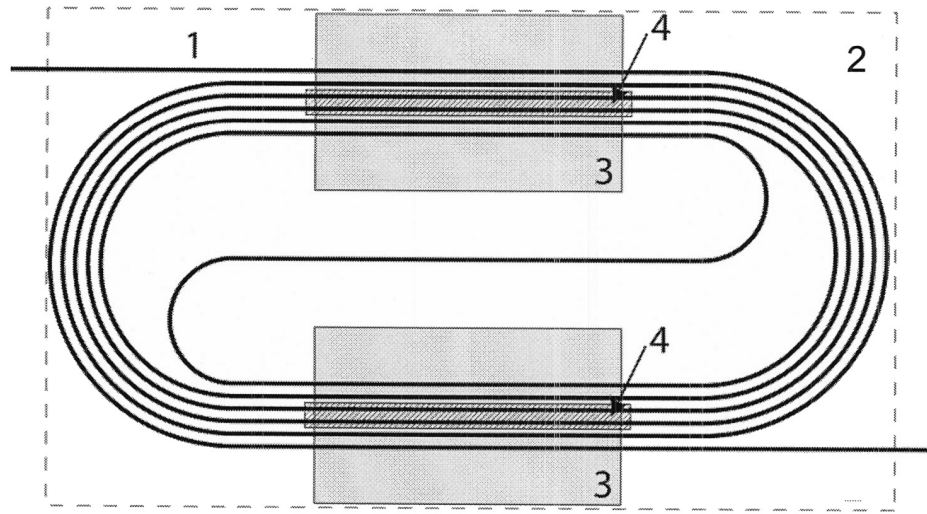


Fig. 4

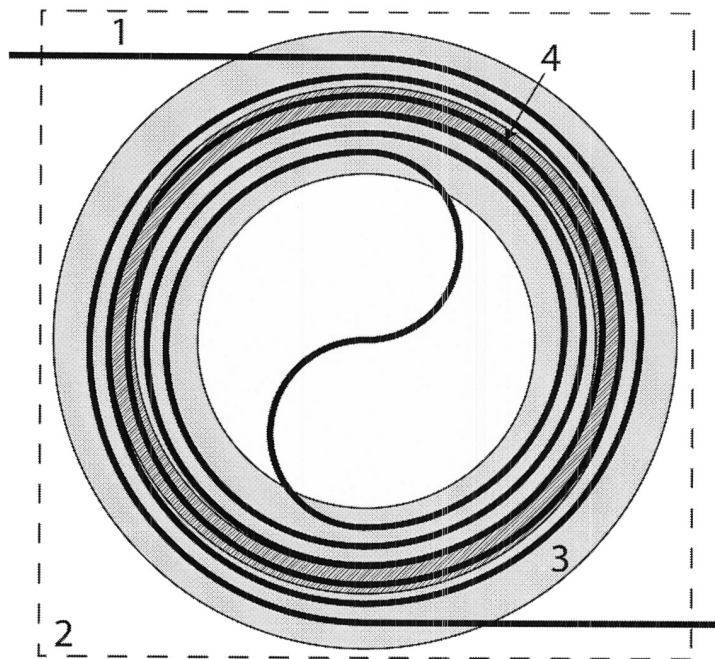


Fig. 5

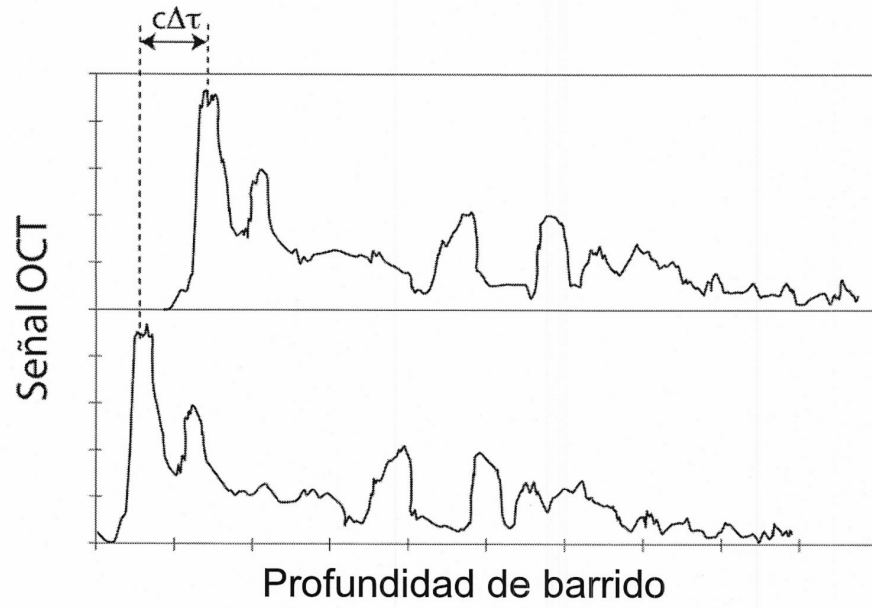


Fig. 6

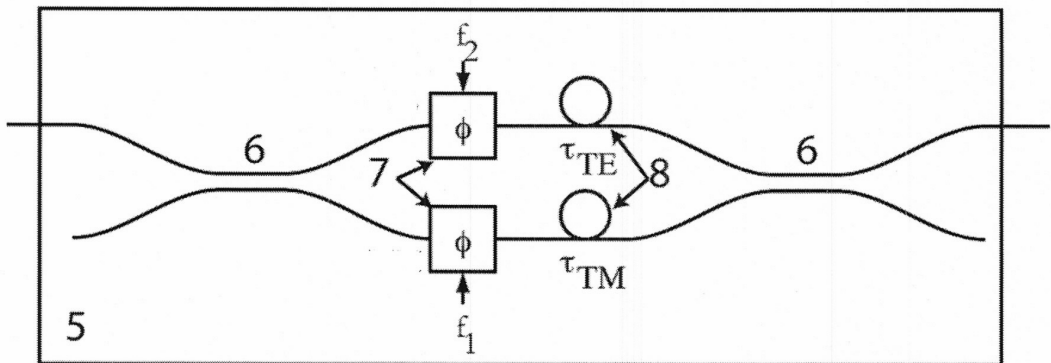


Fig. 7

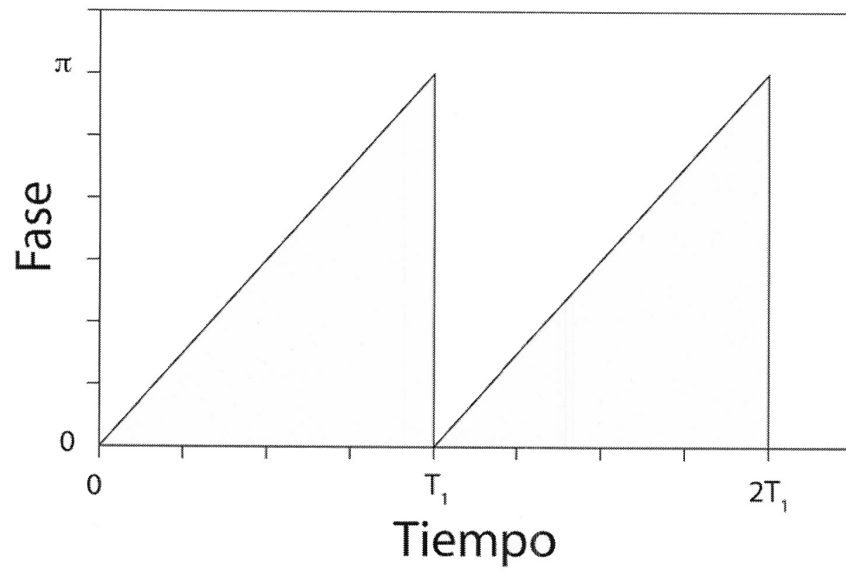


Fig. 8

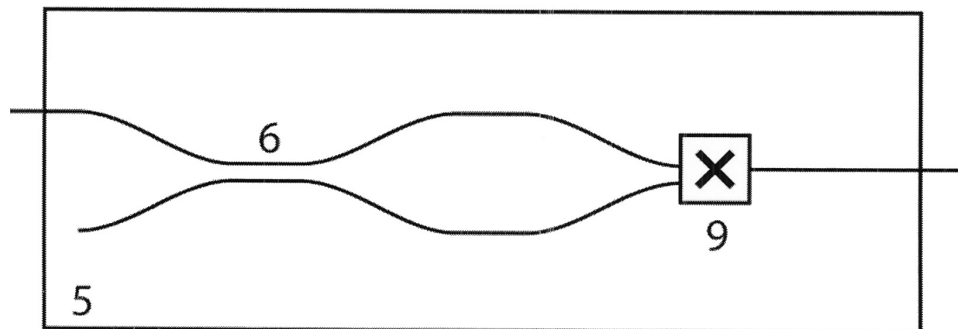


Fig. 9

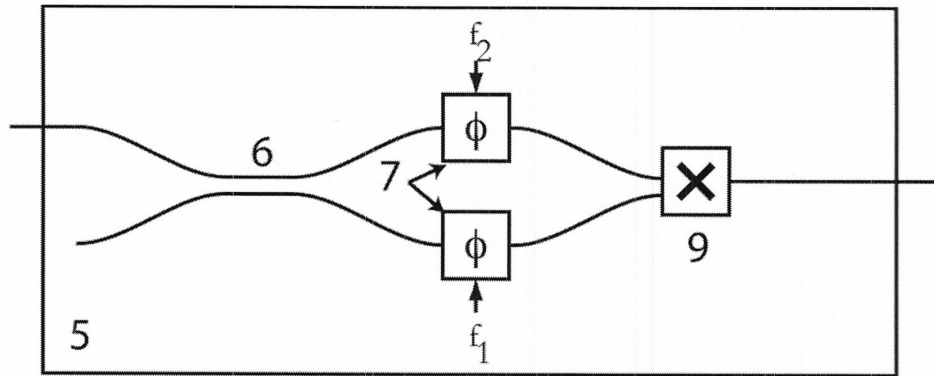


Fig. 10

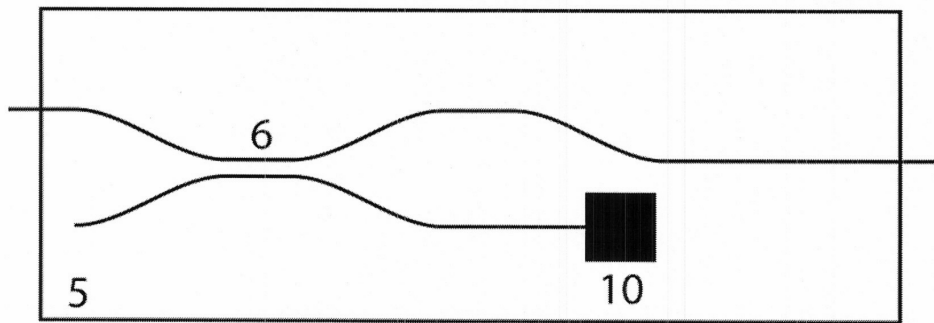


Fig. 11

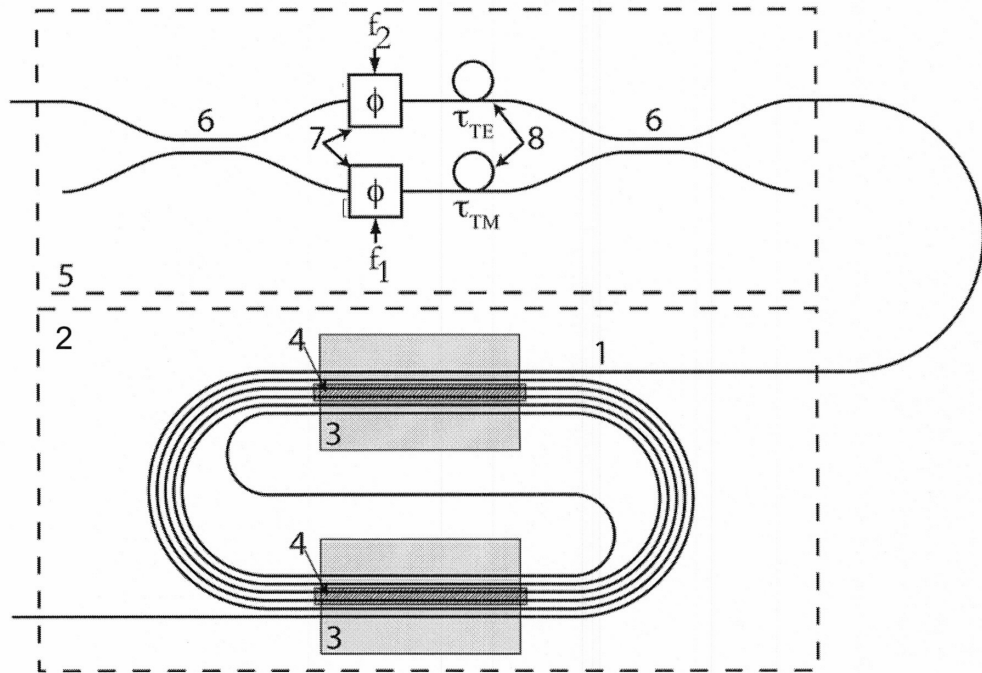


Fig. 12

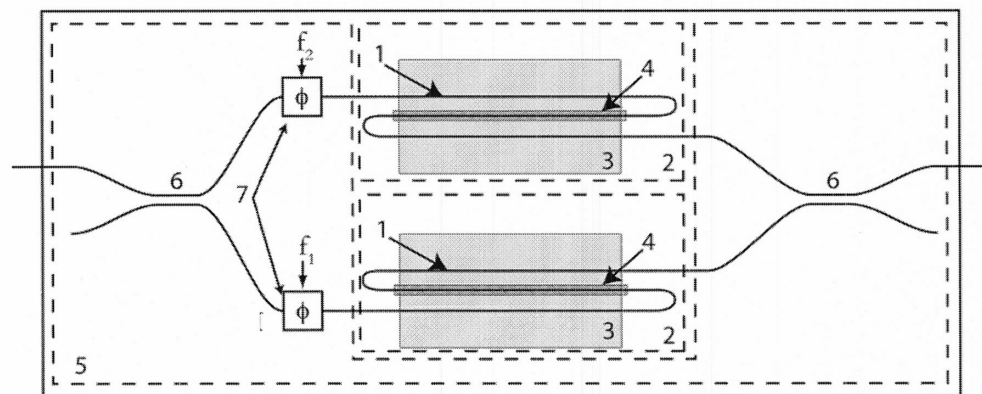


Fig. 13

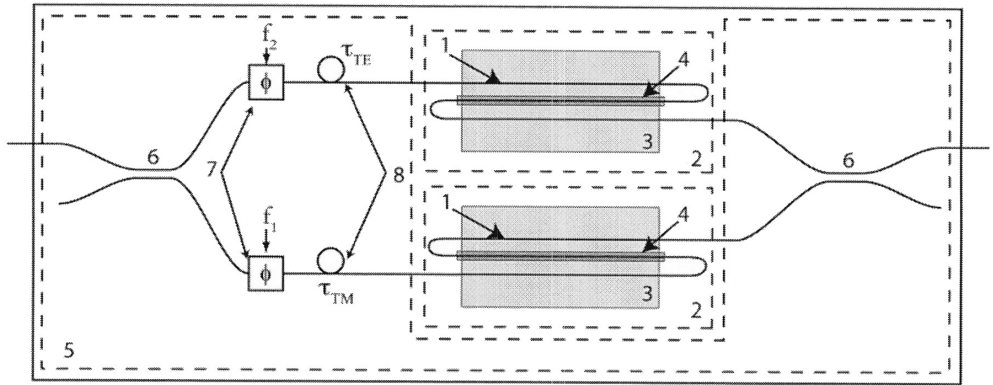


Fig. 14

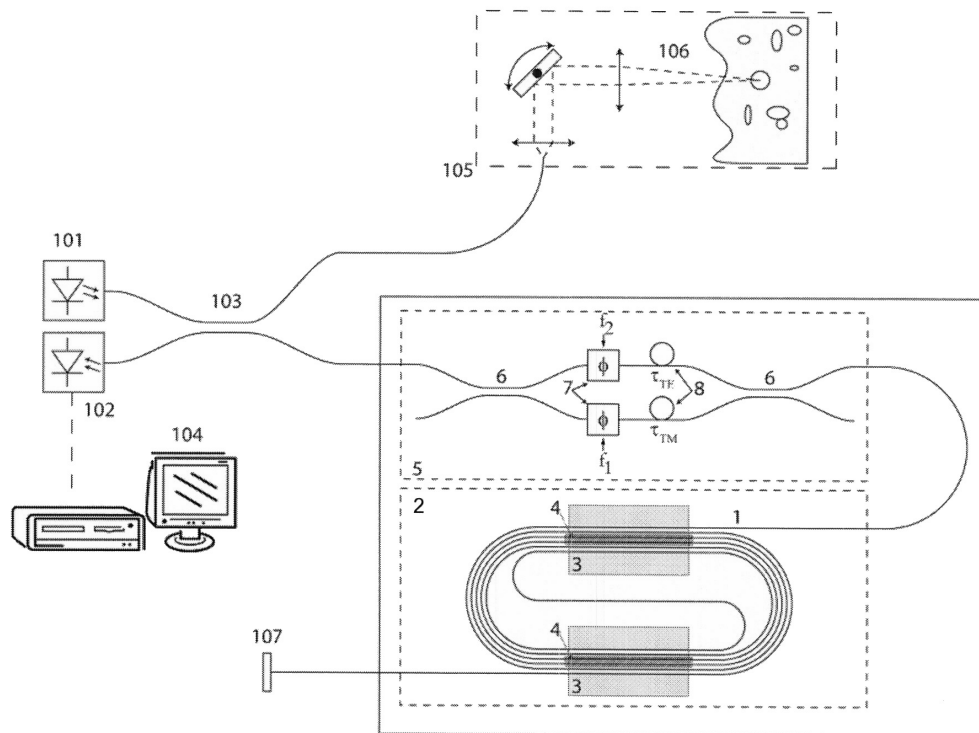


Fig. 15

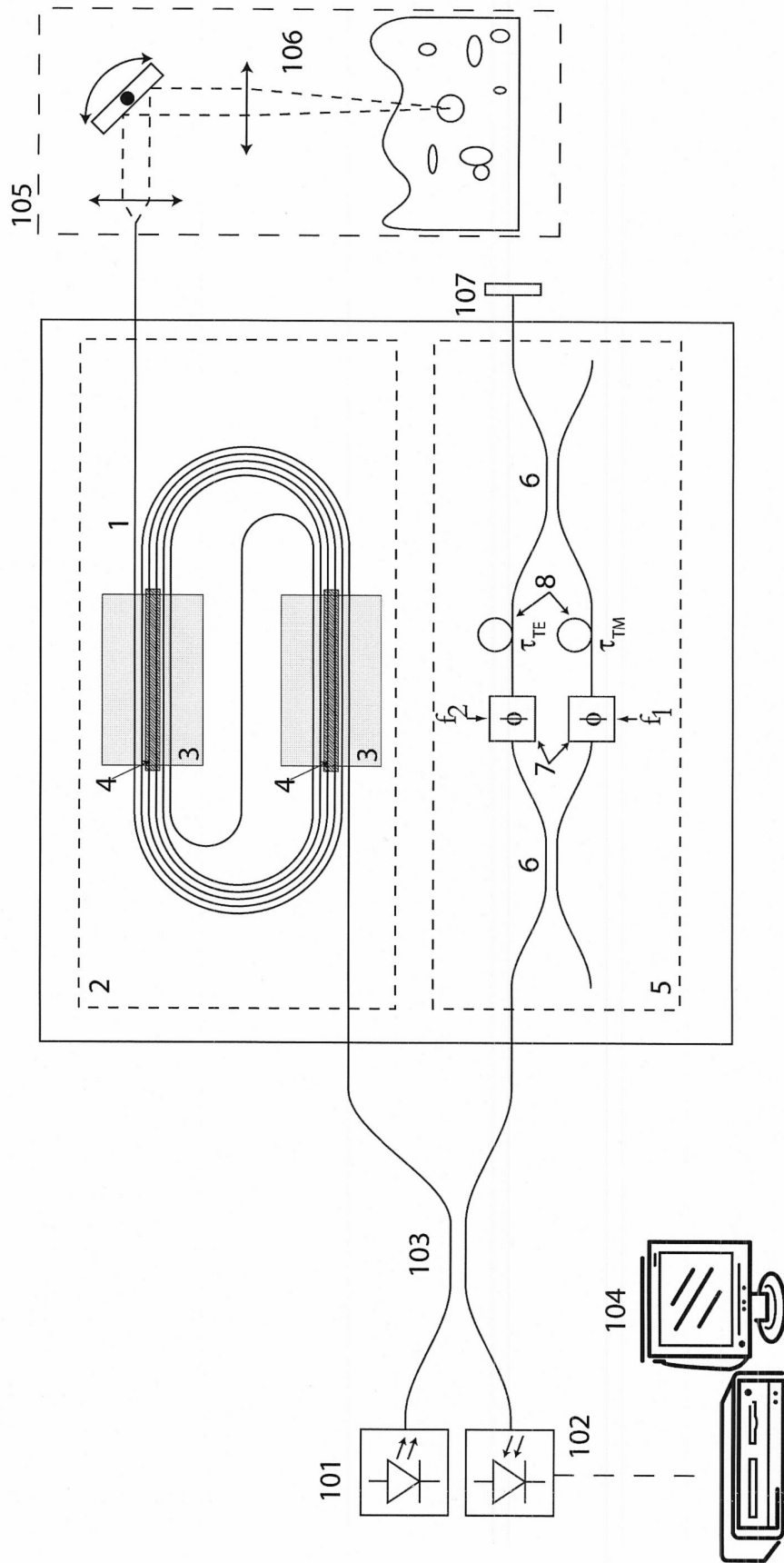


Fig. 16