

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 813 581**

51 Int. Cl.:

G01R 15/24 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.07.2016 PCT/EP2016/067569**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.01.2018 WO18014975**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.07.2016 E 16744707 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.06.2020 EP 3488251**

54 Título: **Dispositivo de sensor que tiene un divisor de haz integrado**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
24.03.2021

73 Titular/es:
**ABB POWER GRIDS SWITZERLAND AG (100.0%)
Bruggerstrasse 72
5400 Baden, CH**

72 Inventor/es:
**BOHNERT, KLAUS;
FRANK, ANDREAS;
YANG, LIN;
GU, XUN y
MÜLLER, GEORG**

74 Agente/Representante:
ELZABURU, S.L.P

ES 2 813 581 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

Dispositivo de sensor que tiene un divisor de haz integrado

Campo de la invención

5 La invención se refiere a un dispositivo de sensor óptico que tiene un divisor de haz con óptica integrada, tal como se emplea, por ejemplo, para mediciones de corriente y tensión en alta tensión.

Antecedentes de la invención

10 Una clase importante de sensores ópticos se basa en el envío de un haz de luz de sondeo hacia un cabezal de sensor, en donde a dos componentes de polarización del haz luminoso se les somete a un desplazamiento de fase que depende de un parámetro a medir (el mensurando). Después se analizan los componentes de polarización de la luz que retorna, para determinar su desplazamiento mutuo de fase.

15 Algunas realizaciones de sensores de corriente de fibra óptica como ejemplo de dichos sensores, por ejemplo para uso en subestaciones de alta tensión, emplean comúnmente el efecto Faraday sobre una fibra óptica [1, 2]. Se enrolla la fibra formando una o varias vueltas en torno al conductor de corriente. El campo magnético de la corriente induce un desplazamiento diferencial de fase entre las ondas luminosas polarizadas circularmente a izquierda y derecha que se propagan a través de la fibra. Existen diversas técnicas para medir el desplazamiento de fase magnetoóptico. Habitualmente, los sensores de corriente de altas prestaciones utilizan una técnica interferométrica basada en la modulación de fase no recíproca, que también es conocida a partir de los giroscopios de fibra [2 - 4]. El método es sofisticado y requiere componentes costosos, en particular un modulador con óptica integrada y una fibra mantenadora de polarización (PMF, por sus siglas en inglés). Los esquemas de detección polarimétrica más simples 20 utilizan componentes ópticos pasivos, tales como combinaciones de polarizadores y placas de onda [5, 6] o polarizadores y rotadores de Faraday [7, 8] que convierten el desplazamiento de fase magnetoóptico en un cambio en la potencia óptica transmitida. En este caso, las placas de onda (o rotadores) inducen un sesgo de fase de 90° (o, lo que es equivalente, una rotación de polarización de 45°) entre las ondas luminosas interferentes. El punto de trabajo del sensor (sesgo de fase a corriente cero) está entonces en el rango lineal de la función de respuesta sinusoidal del sensor. A menudo, los sensores de este tipo trabajan con dos canales de detección. La potencia óptica en los dos canales varía con la fase opuesta en respuesta a la corriente aplicada. La diferencia entre las dos señales, dividida por su suma, es proporcional a la corriente e independiente de la fuente de energía.

30 El documento WO2007/121592 describe un sensor en el cual el desplazamiento de fase magnetoóptico se convierte en dos señales antifase de sensor mediante una combinación de un divisor de haz con óptica integrada, un retardador de cuarto de onda y láminas polarizadoras [5].

El documento WO2015/090448 describe métodos particulares de procesamiento de señal para dicho sensor [6], y la Figura 1 muestra una configuración de un sensor de este tipo.

35 El dispositivo de la Figura 1 comprende una unidad 1 de electrónica de sensor, o unidad de optoelectrónica, y un cabezal 2 de sensor conectado por fibras 3. En la unidad 1 de electrónica de sensor, luz procedente de una fuente luminosa 4 de banda ancha es despolarizada y transmitida a través de una fibra óptica monomodo SMF1 hacia un dispositivo 5 divisor de haz 1 × 3. Un polarizador P1 polariza la luz, y después la luz es transmitida a través de un espaciador 7 desde una primera faceta hacia una guía de onda de un divisor 8 de haz con óptica integrada. Preferiblemente, la dirección de polarización del polarizador P1 forma 45° con respecto a la normal a la superficie del divisor 8 de haz.

40 En una segunda faceta opuesta del divisor 8 de haz, la luz se acopla a un casquillo en espiral (en inglés, "pigtail") 9 de fibra mantenadora de polarización (PMF). Los ejes principales de fibra son paralelos y perpendiculares a la normal a la superficie del divisor 8 de haz, es decir, forman 45° con la dirección de polarización del polarizador P1, de forma que resultan excitados los dos modos ortogonales de polarización de la PMF.

45 La luz procedente del casquillo en espiral 9 de la PMF es alimentada a través de un retardador 10 de fibra antes de que entre en una fibra de detección 11. La fibra de detección 11 forma un arrollamiento en torno a un conductor 12 de corriente. El retardador 10 convierte las ondas luminosas linealmente polarizadas de manera ortogonal que salen de la PMF en ondas polarizadas circularmente a izquierda y derecha. La luz se refleja en un revestimiento reflectante, es decir, un reflector 13, en el extremo más lejano de la fibra de detección 12 y luego atraviesa por segunda vez la fibra de detección 12. Con la reflexión, los estados de polarización de las dos ondas luminosas se intercambian, es decir, la luz circular hacia la izquierda se convierte en circular hacia la derecha, y a la inversa. 50 El retardador 10 convierte las ondas circulares reflejadas de nuevo en ondas lineales ortogonales. Las ondas ortogonales que retornan presentan un desplazamiento de fase magnetoóptico $\Delta\phi$ a consecuencia del efecto Faraday (véase la ecuación 3 más adelante).

55 Dentro del divisor 8 de haz, la luz que retorna se divide hacia un primer y un segundo canales de detector. Una placa retardadora de cuarto de onda QWR (abreviada así por sus siglas en inglés) en la primera faceta induce un retardo de fase diferencial de 90° (sesgo de fase) entre las ondas ortogonales de los dos canales. Los ejes principales de la

QWR están alineados de forma paralela a los ejes del casquillo en espiral 9 de la PMF, y forman 45° con el polarizador P1. Las ondas ortogonales del primer canal interfieren en el polarizador P1 (que es común al canal de fuente luminosa y al canal 1 de detector). Las ondas ortogonales del segundo canal interfieren en un polarizador P2. La dirección de polarización del polarizador P2 forma 90° con la del polarizador P1. Después, dos fibras monomodo (SMF 2 y SMF 3) guían típicamente la luz de los dos canales a fotodetectores PD1 y PD2 en la unidad 1 de electrónica de sensor.

En la práctica, se ha encontrado que el diseño de la Figura 1 presenta un cierto grado de dependencia frente a la temperatura e inestabilidad de la señal. Esta inestabilidad puede evitar que el sensor alcance la precisión requerida para la clase de medición. Las aplicaciones en alta tensión requieren a menudo una precisión dentro de $\pm 0,2\%$ a lo largo de intervalos de temperatura amplios, por ejemplo de -40 °C a 85 °C [9].

El documento WO 2007/121592 describe un dispositivo de sensor que posee un divisor de haz con óptica integrada conforme al preámbulo de la reivindicación 1.

Compendio de la invención

Por lo tanto, el problema que la presente invención debe resolver radica en proporcionar un dispositivo del tipo descrito en lo que antecede, que posea una precisión mejorada.

En un primer aspecto de la invención, el problema antedicho se resuelve mediante un dispositivo de sensor óptico conforme a la reivindicación 1, que comprende las siguientes partes:

- Una fuente luminosa: esta fuente luminosa genera la luz mediante la cual se realiza la medición.
- Una primera fibra: la luz procedente de la fuente luminosa es acoplada a esta primera fibra.
- Un divisor de haz con óptica integrada: el divisor de haz tiene al menos un puerto de entrada del lado de optoelectrónica, al menos un primer y al menos un segundo puertos de salida del lado de optoelectrónica y al menos un puerto del lado de detección. Luz que entra en el puerto de entrada del lado de optoelectrónica es acoplada al menos parcialmente al puerto del lado de detección, y luz que entra en el puerto del lado de detección es dividida al menos parcialmente hacia los puertos de salida del lado de optoelectrónica. La primera fibra está colocada de forma que envía luz al puerto de entrada del lado de optoelectrónica.
- Un elemento de detección cuya birrefringencia (por ejemplo, circular y/o lineal) cambia en función de un mensurando: el elemento de detección está dispuesto de manera que luz procedente del puerto del lado de detección del divisor del haz es acoplada al elemento de detección, reflejada y acoplada de vuelta al puerto del lado de detección, de modo que el divisor de haz pueda dividirla al menos parcialmente hacia los puertos de salida del lado de optoelectrónica.
- Un divisor de haz con óptica integrada: luz procedente de dicha primera fibra es acoplada a un puerto de entrada del lado de optoelectrónica de este divisor de haz.
- Al menos una segunda fibra y una tercera fibra: la luz procedente de los primer y segundo puertos de salida del lado de optoelectrónica es alimentada respectivamente a las segunda y tercera fibras.
- Detectores de luz que miden la luz que sale de las segunda y tercera fibras.

El divisor de haz comprende

- a) una pluralidad de secciones de guía de onda, así como uniones divisoras de haz dispuestas en un plano de guías de onda, y
- b) una primera y una segunda facetas en lados opuestos del divisor de haz, en donde el puerto de entrada del lado de optoelectrónica y los puertos de salida del lado de optoelectrónica están dispuestos en dicha primera faceta y el puerto del lado de detección está dispuesto en dicha segunda faceta.

Además, en una dirección Y paralela a la primera faceta, dicho puerto del lado de detección está desplazado, en un desplazamiento mínimo puerto-puerto distinto de cero, con respecto al puerto de entrada del lado de optoelectrónica, en particular todos los puertos de entrada del lado de optoelectrónica, y con respecto al primer y segundo puertos de salida del lado de optoelectrónica, en particular todos los puertos de salida del lado de optoelectrónica.

Este diseño está basado en la comprensión de que se genera luz dispersada tanto en el puerto de entrada del lado de optoelectrónica como en el puerto del lado de detección, cuando entra luz en el divisor de haz a través de cualquiera de estos puertos. La luz dispersada tiende a propagarse en forma de un campo luminoso comparativamente estrecho a través del divisor del haz hacia la faceta opuesta, donde puede reacoplarse al camino de la señal, si llega a la ubicación del puerto del lado de detección o de uno de los puertos de salida del lado de optoelectrónica. Este reacoplamiento conduce a una inestabilidad de señal no deseada y a efectos inesperados en las mediciones. Si se desplazan los puertos tal como se reivindica, se puede evitar el reacoplamiento.

Además, el puerto del lado de detección está desplazado, a lo largo de la dirección Y, en un desplazamiento mínimo unión-puerto distinto de cero, con respecto a cualquier unión de guía de onda que sea atravesada por la luz procedente del puerto de entrada del lado de optoelectrónica en su camino hacia el puerto del lado de detección. En estas uniones se genera luz parásita que se propaga hacia la segunda faceta. Al desplazar de esta forma el puerto del lado de detección se evita el reacoplamiento de la luz dispersada.

5 En otra realización ventajosa, dichos primer y segundo puertos de salida del lado de optoelectrónica, en particular todos los puertos de salida del lado de optoelectrónica, están desplazados, a lo largo de la dirección Y, en un desplazamiento mínimo unión-puerto distinto de cero, con respecto a cualquier unión que sea atravesada por la luz procedente del puerto del lado de detección en su camino hacia cualquiera de los puertos de entrada o salida del lado de optoelectrónica. En estas uniones se genera luz parásita que se propaga hacia la primera faceta. Al desplazar de esta forma los puertos del lado de optoelectrónica se evita el reacoplamiento de la luz dispersada. Además, también se evita el reacoplamiento de la luz dispersada procedente del puerto de entrada del lado de optoelectrónica a una unión.

Ventajosamente, el dispositivo de sensor comprende:

- 15
- Al menos una segunda fibra y una tercera fibra: la luz procedente del primer y el segundo puertos de salida del lado de optoelectrónica es alimentada a las segunda y tercera fibras, respectivamente.
 - Detectores de luz que miden la luz que sale de las segunda y tercera fibras.
 - Un retardador de cuarto de onda: este retardador está dispuesto entre al menos una de las fibras y el puerto del lado de detección.

20 Además, el divisor de haz comprende un rebaje o hendidura. El retardador de cuarto de onda está dispuesto en dicho rebaje o hendidura, respectivamente. La profundidad de dicho rebaje o la anchura de dicha hendidura es mayor que el grosor de dicho retardador de cuarto de onda, en particular al menos 5 μm mayor, con el fin de facilitar la inserción del retardador. En este contexto, los términos "grosor", "profundidad" y "anchura" describen la extensión del retardador, del rebaje y de la hendidura en una dirección perpendicular a la primera faceta del divisor de haz.

25 Este diseño está basado en la comprensión de que el hecho de colocar el retardador de cuarto de onda en un rebaje o hendidura con espacio de sobra reduce la tensión mecánica sobre el retardador, lo que a su vez reduce perturbaciones indeseadas del retardo de fase entre los modos de polarización.

30 Ventajosamente, el lado de entrada y/o el de salida del retardador de cuarto de onda están bordeando una capa de adhesivo transparente que llena los huecos a uno o ambos lados del retardador, y el módulo de Young de la capa de adhesivo es menor, en al menos en un factor de 10, que el módulo de Young del retardador de cuarto de onda. Esto permite que la capa adhesiva ceda cuando los componentes se ven sometidos a cambios de temperatura, manteniendo así baja la tensión mecánica sobre el retardador.

Ventajosamente, el grosor de la capa adhesiva mide al menos 1 μm .

35 En muchas configuraciones, el dispositivo comprenderá un primer y un segundo polarizador dispuestos entre las fibras y el puerto de entrada del lado de optoelectrónica y entre las fibras y los puertos de salida del lado de optoelectrónica del divisor de haz, para crear polarizaciones definidas al entrar en el divisor de haz y/o para permitir que los modos de la luz que retorna desde el elemento de detección interfieran.

En ese caso, el retardador de cuarto de onda está ventajosamente dispuesto en su rebaje entre al menos uno de dichos polarizadores y el divisor de haz.

40 La invención es particularmente adecuada para medir una corriente o una tensión. En esos casos, el elemento de detección comprende un componente magnetoóptico arrollado en torno a un conductor que transporta la corriente, o un componente electroóptico dispuesto en un campo eléctrico generado por la tensión.

Los dos aspectos de la presente invención pueden utilizarse de manera individual o bien combinados entre sí.

45 La invención también se refiere al uso según la reivindicación 21 del dispositivo de sensor para determinar la temperatura en el retardador de cuarto de onda o para corregir el mensurando a través de la medición de la diferencia entre señales normalizadas procedentes de dichos detectores de luz, donde dicha diferencia se mide en ausencia de un desplazamiento de fase en dicho elemento de detección o se deriva de valores filtrados por paso bajo de dichas señales a lo largo de varios períodos de un mensurando periódico. La temperatura medida de esta manera se puede utilizar, por ejemplo, para compensar los efectos de la temperatura sobre los resultados de la medición, es decir, se puede emplear para corregir el mensurando.

50 En este contexto, la diferencia entre las señales "normalizadas" consiste en la diferencia entre estas señales después de un escalado opcional de una o ambas señales para compensar, por ejemplo, pérdidas individuales en cada camino de señal.

Breve descripción de los dibujos

Se entenderá mejor la invención y se harán evidentes objetos distintos de los expuestos en lo que antecede cuando se considere la siguiente descripción detallada de la misma. Esta descripción hace referencia a los dibujos anexos, en los cuales:

- 5 la Figura 1 muestra una configuración de sensor según se describe en [6],
 la Figura 2 muestra la dispersión luminosa en un divisor de haz convencional,
 la Figura 3 muestra una realización de una configuración de sensor con precisión mejorada,
 la Figura 4 muestra el divisor de haz de la realización de la Figura 3,
 la Figura 5 muestra una realización adicional de un divisor de haz,
 10 la Figura 6 muestra una realización adicional de un divisor de haz,
 la Figura 7 muestra una realización adicional de un divisor de haz,
 la Figura 8 muestra la variación del desplazamiento de CC normalizado en función de la temperatura del divisor,
 la Figura 9 muestra la señal del sensor en función de la temperatura del divisor para una corriente aplicada constante, después de la compensación de temperatura, y
 15 la Figura 10 muestra un dispositivo de sensor alternativo.

Descripción detallada*Inconvenientes de diseños convencionales*

20 La Figura 2 muestra un divisor de polarización para uso en un sensor polarimétrico de corriente según [6] (nota: al contrario de lo que se ha dibujado de manera esquemática en la Figura 2 y en algunas de las figuras que siguen, las guías de onda se flexionan y las uniones no tienen esquinas agudas, sino que en realidad se fabrican con una curvatura definida). Corrientemente, las guías de onda se fabrican en un sustrato de vidrio mediante intercambio de iones asistido por campo eléctrico [10]. El divisor 8 de haz con óptica integrada básico es un divisor 1×3 (denominado a menudo divisor PLC, siglas inglesas de circuito de guía plana de onda luminosa) complementado con óptica de analizador y casquillos en espiral de fibra ensamblados en las facetas finales tal como se ha descrito más arriba.

25 En la realización de la Figura 2, la guía 14 de onda central es esencialmente una conexión directa entre la fibra PMF en una faceta y la fibra monomodo central (SMF2) en la faceta opuesta. Las dos guías 15, 16 de onda externas se separan de la guía 14 de onda central en uniones en Y asimétricas 17, 18 de guía de onda [11]. Sin embargo, también es posible un diseño de guía de onda con uniones en Y simétricas, tal como se muestra en la Figura 1.
 30 Preferiblemente, las uniones 17, 18 están diseñadas con relaciones de división tales que la potencia óptica acoplada en el divisor desde el lado de la PMF se divide en cantidades iguales hacia los tres canales de salida. La primera unión desde la derecha tiene entonces una relación de división 1:2, mientras que la otra unión tiene una relación 1:1.

35 Existe una pérdida inevitable de potencia óptica en cada interfaz de fibra a guía de onda, y en las uniones en Y 17, 18 de guía de onda. Las causas de la pérdida en la interfaz de fibra a guía de onda consisten en desajustes en los índices de refracción y las aperturas numéricas, el intersticio entre las SMF y las guías de onda necesario para la óptica de analizador, y también la posible desalineación. Las pérdidas en las uniones son pérdidas de radiación inherentes [11]. En particular, mientras que la onda luminosa procedente del extremo de rama única de la unión en Y se puede dividir 1:1 hacia las dos ramas del otro lado con una pérdida mínima, solamente el 50% de la potencia de una onda luminosa en la dirección opuesta, procedente de una de las dos las ramas, sería acoplado a la guía de
 40 onda en el lado de rama única, siendo la otra mitad disipada hacia el sustrato.

La luz perdida viaja como luz parásita no guiada a través del chip divisor, de manera esencialmente paralela a las guías de onda. En la Figura 2, las regiones con luz parásita más intensa se representan como zonas sombreadas 19.

45 Se pueden acoplar entonces a la PMF 9 o a las SMF de los dos canales de detector pequeñas fracciones de la luz parásita, o se pueden reacoplar a las guías de onda en las uniones en Y 17, 18 y mezclarse con la luz de señal guiada.

50 La longitud del divisor 8 de haz puede situarse en el entorno de aproximadamente 10 mm. Para esta dimensión, se ha determinado por medición que la anchura de los haces de luz parásita a 1310 nm que se originan en la faceta de la SMF alcanza aproximadamente $100 \mu\text{m} - 150 \mu\text{m}$ en la faceta de la PMF opuesta, mientras que una separación típica de las guías de onda en la faceta de la SMF mide $250 \mu\text{m}$. Por lo tanto, se pueden acoplar a la PMF las franjas

externas del haz de luz parásita procedente del canal fuente (SMF 1), junto con radiación procedente de las uniones en Y 17, 18. Análogamente, la luz parásita procedente de la faceta de la PMF y de las uniones en Y puede acoplarse a las dos SMF de los canales de detector (SMF 2, 3). Esto resulta particularmente cierto para la SMF del canal interno (SMF 2)

- 5 La fase de la luz parásita que se reacopla a las fibras difiere de la fase de la luz que ha viajado a través de las guías de onda, ya que los índices de refracción efectivos de las guías de onda y del sustrato difieren. Además, tanto la intensidad relativa de la luz parásita reacoplada como la diferencia de fase cambian con la temperatura. Por lo tanto, la luz parásita modifica la intensidad de interferencia en los dos canales de detector de una manera que depende de la temperatura. Dado que los efectos parásitos presentan escasa reproducibilidad, pueden variar y degradar gravemente la precisión del sensor. Una fracción relativa de potencia de luz parásita de solamente 1 ppm conduce ya a una modulación pico a pico de la intensidad de interferencia de 0,4%, en función de la diferencia de fase entre la luz parásita y la luz guiada. Resulta obvio que si el sensor debe alcanzar la precisión requerida para la clase de medición (típicamente, el error debe ser $<\pm 0,2 \%$, como se ha indicado más arriba), la supresión de la luz parásita es esencial.
- 10
- 15 Otro efecto perturbador que resulta adverso para la precisión de la medición son los esfuerzos dependientes de la temperatura que aparecen sobre la lámina retardadora de cuarto de onda QWR. A consecuencia de ello, el sesgo de fase de las ondas luminosas interferentes no solo manifiesta la dependencia frente a la temperatura de la birrefringencia natural del retardador, sino también de una birrefringencia en gran medida aleatoria ocasionada por los esfuerzos, asimismo con escasa reproducibilidad.
- 20 Se describen en lo que sigue modificaciones del divisor de polarización destinadas a eliminar o reducir las deficiencias discutidas en lo que antecede.

Divisor de polarización mejorado

La Figura 3 muestra un sensor similar al de la Figura 1. Comprende una unidad 1 de electrónica de sensor con una fuente luminosa 4 de banda ancha, por ejemplo un diodo superluminiscente. Su luz es despolarizada en un despolarizador Lyot de fibra (no mostrado) y acoplada a una fibra óptica monomodo SMF1 para ser conducida a un cabezal 2 de sensor que comprende un dispositivo 5 divisor de haz 1×3 . En el dispositivo 5 divisor de haz, la fibra SMF 1 está sujeta en un primer soporte 20 de fibra colocado de manera que la luz que sale de la SMF1 atraviesa un primer polarizador P1 y el retardador de cuarto de onda QWR dispuesto en un rebaje en la primera faceta de un divisor 8 de haz con óptica integrada.

30 Ventajosamente, la dirección de polarización del polarizador P1 forma 45° con respecto a la normal a la superficie del divisor 8 de haz. Después, la luz es acoplada a una guía de onda del divisor 8 de haz.

En la segunda faceta opuesta del divisor 8 de haz, la luz se acopla a un casquillo en espiral 9 de fibra mantenedora de polarización (PMF) sujeto en un segundo soporte 21 de fibra. Los ejes principales de fibra del casquillo en espiral 9 de la PMF son paralelos y perpendiculares a la normal a la superficie del divisor 8 de haz, es decir, forman 45° con la dirección de polarización del polarizador P1. En consecuencia, los dos modos ortogonales de polarización de la fibra PM resultan excitados con la misma amplitud.

35 Los ejes principales de la QWR están alineados de forma paralela a los ejes del casquillo en espiral 9 de la PMF, y forman 45° con el polarizador P1.

Al igual que en la realización de la Figura 1, la luz procedente del casquillo en espiral 9 de la PMF es alimentada a través de un retardador 10 de fibra antes de que la luz entre en una fibra de detección 11. La fibra de detección 11 forma un arrollamiento con un número entero de vueltas de fibra en torno a un conductor 12 que transporta la corriente a medir. La luz se refleja en un reflector 13 situado en el extremo más lejano de la fibra de detección 12 y luego atraviesa por segunda vez la fibra de detección 12. Con la reflexión, los estados de polarización de las dos ondas luminosas se intercambian, es decir, la luz circular a la izquierda se convierte en circular a la derecha y a la inversa.

45 El retardador 10 convierte las ondas circulares reflejadas de nuevo en ondas lineales ortogonales. Las direcciones de polarización de las ondas lineales que retornan también resultan intercambiadas en comparación con las ondas que se propagan hacia adelante. Las ondas ortogonales que retornan presentan un desplazamiento de fase magnetoóptico $\Delta\phi$ a consecuencia del efecto Faraday (véase la ecuación 3 más adelante).

50 Dentro del divisor 8 de haz, la luz que retorna se divide en un primer y un segundo canales. Las ondas ortogonales del primer canal interfieren en el polarizador P1 (que es común al canal de fuente luminosa y al primer canal). Las ondas ortogonales del segundo canal interfieren en un polarizador P2. La dirección de polarización del polarizador P2 forma 90° con la del polarizador P1.

55 Dos fibras monomodo (SMF2 y SMF3) guían la luz de los dos canales hacia los fotodetectores PD1 y PD2 de la unidad 1 de electrónica de sensor.

Las guías de onda del divisor 8 de haz son de baja birrefringencia, para no alterar el estado de polarización de la luz transmitida. Como alternativa, las guías de onda son birrefringentes con los ejes principales paralelos y perpendiculares al plano del chip SC (chip de guía de onda o de divisor de haz). En este último caso, los retardos de fase birrefringentes de las ondas ortogonales en los caminos hacia adelante y de retorno se cancelan mutuamente, siempre que todos los canales tengan la misma birrefringencia.

Preferiblemente, los polarizadores P1, P2 son láminas delgadas de vidrio que contienen partículas metálicas (por ejemplo, de plata) o macromoléculas orientadas, con el fin de polarizar la luz. Es un grosor típico, por ejemplo, 30 µm. Gracias al reducido grosor se pueden mantener bajas las pérdidas por acoplamiento entre la fibra y el divisor de haz. Por la misma razón, la lámina retardadora de cuarto de onda es una lámina de orden cero. El grosor de un retardador de cuarzo correspondiente mide aproximadamente 39 µm para una longitud de onda de 1310 nm.

Típicamente, la fibra de detección es una fibra de baja birrefringencia o una fibra altamente birrefringente hilada.

En condiciones ideales (alineación angular perfecta de los componentes, ausencia de acoplamiento cruzado entre los dos modos ortogonales de polarización, ausencia de pérdida óptica asimétrica en los dos canales de detección, fibra de detección libre de birrefringencia lineal, retardador de fibra con retardo exacto de cuarto de onda), las dos señales de detector, como función del desplazamiento de fase magnetoóptico $\Delta\phi$, están dadas por

$$S_1 = (S_0/2) (1 + \text{sen } \Delta\phi) \quad (1)$$

$$S_2 = (S_0/2) (1 - \text{sen } \Delta\phi) \quad (2)$$

con

$$\Delta\phi = 4NVI \quad (3)$$

Aquí, N, V e I son respectivamente el número de espiras del arrollamiento de fibra, la constante de Verdet de la fibra de detección ($\sim 1 \mu\text{rad/A}$ a 1310 nm) y la intensidad de corriente eléctrica (el mensurando). S_0 es proporcional a la potencia de la fuente luminosa.

La diferencia entre las dos señales, dividida por su suma, proporciona una señal S de salida del sensor, que es independiente de la potencia de la fuente luminosa (estado de la técnica):

$$S = (S_1 - S_2) / (S_1 + S_2) \quad (4)$$

$$S = \text{sen } \Delta\phi \quad (5)$$

Para $\Delta\phi \ll 1$ (lo que suele ser el caso en condiciones normales de funcionamiento), S varía linealmente con $\Delta\phi$:

$$S = \Delta\phi \quad (6)$$

En el documento WO2015/090448A1 [6] se ofrecen más detalles acerca del procesamiento de señal.

La Figura 4 muestra con mayor detalle el diseño de guía de onda del divisor 8 de haz de la Figura 3. Se ha modificado el diseño con el objetivo de evitar que la luz parásita interfiera con la luz guiada. El divisor 8 de haz comprende una pluralidad de secciones W1 - W5 de guía de onda dispuestas en un plano (el plano de guías de onda), así como una pluralidad de uniones J1, J2 divisoras de haz.

Una primera sección W1 de guía de onda se extiende entre la primera faceta 22 del divisor 8 de haz y la primera unión J1. Una segunda sección W2 de guía de onda se extiende entre la primera faceta 22 y la segunda unión J2, y una tercera sección W3 de guía de onda se extiende también entre la primera faceta 22 y la segunda unión J2. Una cuarta sección W4 de guía de onda se extiende entre la primera unión J1 y la segunda unión J2. Una quinta sección W5 de guía de onda se extiende entre la primera unión J1 y la segunda faceta 23 del divisor 8 de haz.

La primera sección W1 de guía de onda está acoplada a la fibra monomodo SMF1, la segunda sección W2 de guía de onda está acoplada a la fibra monomodo SMF2, la tercera sección W3 de guía de onda está acoplada a la fibra monomodo SMF3 y la quinta sección W5 de guía de onda está acoplada a la fibra mantenedora de polarización PMF.

El divisor 8 de haz forma cuatro puertos PT1, PT2, PT3 y PT5 por los cuales puede entrar y/o salir luz de las guías de onda. El puerto PT1 está ubicado donde la primera sección W1 de guía de onda termina en la primera faceta 22. El puerto PT2 está ubicado donde la segunda sección W2 de guía de onda termina en la primera faceta 22. El puerto PT3 está ubicado donde la tercera sección W3 de guía de onda termina en la segunda faceta 22. El puerto PT5 está ubicado donde la quinta sección W5 de guía de onda termina en la segunda faceta 23.

Al puerto PT1 se le denomina también puerto de entrada del lado de optoelectrónica, ya que recibe luz procedente de la unidad 1 de electrónica de sensor y la acopla al divisor 8 de haz. A los puertos PT2, PT3 se les denomina también puertos de salida del lado de optoelectrónica, ya que emiten luz que ha de ser devuelta a la unidad 1 de

electrónica de sensor. Al puerto PT5 se le denomina también puerto del lado de detección, ya que emite y recibe luz hacia o desde el elemento de detección formado por los componentes 10, 12 y 13.

5 Los puertos PT1, PT2, PT3 están típicamente separados por distancias iguales a , designando a la separación entre las ranuras del soporte 20 de fibra. Como alternativa, si se dejan vacías una o más ranuras del soporte 20 de fibra, la separación entre los puertos puede ser un múltiplo entero de la distancia a .

En el puerto PT1, la luz procedente de la fibra monomodo SMF1 entra en la primera sección W1 de guía de onda y, en parte, es acoplada a la quinta sección W5 de guía de onda para salir, en el puerto PT5, hacia la fibra mantenedora de polarización PMF.

10 En el puerto PT5, la luz que retorna desde la fibra mantenedora de polarización PMF es acoplada a la quinta sección W5 de guía de onda, y es dividida en la primera unión J1, por ejemplo en partes iguales, hacia la primera sección 1 de guía de onda (y, por lo tanto, el puerto PT1 de entrada del lado de optoelectrónica) y la cuarta sección 4 de guía de onda (y por lo tanto, la segunda unión J2). La luz que llega a través de la cuarta sección W4 de guía de onda a la segunda unión J2 es dividida, por ejemplo en partes iguales, hacia la segunda sección W2 de guía de onda (y, por lo tanto, el primer puerto PT2 de salida del lado de optoelectrónica) y la tercera sección W3 de guía de onda (por lo tanto, el segundo puerto de salida PT3 del lado de optoelectrónica) para ser acoplada en los puertos PT2 y PT3 de salida del lado de optoelectrónica hacia la segunda y tercera fibras monomodo SMF2 y SMF3, respectivamente.

20 Las ubicaciones de los puertos y de las uniones en el divisor 8 de haz han sido optimizadas para reducir el acoplamiento de luz indeseado. Esto se explica en lo que sigue, haciendo referencia a un sistema de coordenadas X/Y tal como se muestra en la Figura 4. En este sistema, X designa la dirección entre las facetas 22 y 23, es decir, la dirección primaria a lo largo de la cual se propaga la luz en el divisor 8 de haz. Y designa la dirección paralela a la primera faceta 22 y paralela al plano de guías de onda.

Como se puede apreciar, todas las uniones J1, J2 de guía de onda, así como los puertos PT1, PT2, PT3, PT5, están mutuamente desplazados a lo largo de la dirección Y.

25 En particular, el puerto PT5 del lado de detección está mutuamente desplazado con respecto a todos los puertos PT1 - PT3 del lado de optoelectrónica en un desplazamiento mínimo distinto de cero. Este desplazamiento mínimo depende de la distancia L entre las facetas 22, 23 y mide (para aperturas típicas de los campos de luz parásita) al menos $L/20$, ventajosamente al menos $L/10$. 250 μm son un buen desplazamiento mínimo para un divisor 8 de haz de tamaño típico, y en particular este puede ser igual a la distancia a .

30 En la presente realización, las uniones J1, J2 de guía de onda están desplazadas lateralmente a lo largo de Y en una distancia $a/2$ con respecto a los puertos PT1, PT2, PT3. Las partes rectas de las secciones W1, W2, W3 de guía de onda, es decir, las partes que se extienden de forma paralela a la dirección X, están separadas entre sí por la distancia a . Por lo tanto, es menos probable que la luz que irradia desde las uniones J1, J2 de guía de onda (como se indica en la Figura 4) se acople a las SMF.

35 En términos generales, el puerto PT5 del lado de detección está ventajosamente desplazado (a lo largo de la dirección Y), en un desplazamiento mínimo unión-puerto distinto de cero, con respecto a cualquier unión (unión J1 en la realización de la Figura 4) que sea atravesada por la luz procedente del puerto PT1 de entrada del lado de optoelectrónica en su camino hacia el puerto PT5 del lado de detección.

40 De manera similar, los puertos de salida del lado de optoelectrónica utilizados (en el caso de la Figura 4, los puertos PT2 y PT3) están desplazados (a lo largo de Y) en un desplazamiento mínimo unión-puerto distinto de cero con respecto a cualquier unión (J1, J2 en la Figura 4) que sea atravesada por la luz desde el puerto PT5 del lado de detección hacia cualquiera de los puertos (PT1 - PT3) del lado de optoelectrónica utilizados.

45 Este desplazamiento mínimo unión-puerto depende de la distancia L entre la unión y la faceta respectiva. Si la mayor de dichas distancias es D, el desplazamiento unión-puerto mide ventajosamente al menos $D/20$, ventajosamente al menos $D/10$. 125 μm son un buen desplazamiento mínimo para un divisor de haz de tamaño típico (donde L mide del orden de 10 - 30 mm).

La distancia a se elige lo suficientemente grande como para reducir a niveles subcríticos el acoplamiento de luz parásita procedente de las uniones en Y J1, J2 a las SMF. Ventajosamente, a debe medir al menos 250 μm .

Una distancia ventajosa es $a = 500 \mu\text{m}$. Otra distancia ventajosa es $a = 250 \mu\text{m}$. Una distancia más corta entre guías de onda reduciría la longitud de chip divisor alcanzable.

50 Ventajosamente, a lo largo de la dirección Y:

- la primera unión J1 está dispuesta entre, ventajosamente en el centro entre, el puerto PT1 de entrada del lado de optoelectrónica y el primer puerto PT2 de salida del lado de optoelectrónica; y/o
- la segunda unión J2 está dispuesta entre, ventajosamente en un centro entre, el primer y dicho segundo puertos PT2, PT3 de salida del lado de optoelectrónica.

El quinto puerto PT5, y por lo tanto la PMF, está desplazado lateralmente con respecto a los puertos PT1, PT2, PT3, en particular con respecto al primer puerto PT1, siendo dispersada una gran cantidad de luz en la dirección de la segunda faceta 23.

5 Ventajosamente, el quinto puerto PT5 está desplazado a lo largo de la dirección Y con respecto al primer puerto PT1 en una distancia a (o superior).

También ventajosamente, el puerto TP5 del lado de detección está desplazado a lo largo de la dirección Y con respecto a la primera unión J1 en una distancia a (o superior), ya que se dispersa una gran cantidad de luz desde la primera unión J1 en la dirección de la segunda faceta 23.

10 Además, los puertos segundo y tercero PT2 y PT3 están ventajosamente desplazados a lo largo de la dirección Y con respecto al quinto puerto PT5 en una distancia de al menos a , y/o con respecto a la primera unión J1 y/o la segunda unión J2 en al menos $a/2$.

De este modo se evita eficazmente que la luz parásita procedente de la fuente SMF (SMF 1) y de las uniones de guía de onda se acople a la PMF. A la inversa, la luz parásita generada en la transición desde la PMF al quinto puerto PT5 no puede acoplarse a las guías de onda en las uniones en Y ni a las SMF.

15 La Figura 4 muestra una modificación adicional para evitar esfuerzos sobre la placa del retardador de cuarto de onda QWR.

20 La primera faceta 22 del divisor 8 de haz está dotada de un rebaje 24, dentro del cual está ubicado el retardador de cuarto de onda QWR de manera libre de esfuerzos. El rebaje 22 puede tener una profundidad (en la dirección X) dentro del intervalo, por ejemplo, de 40 μm a 150 μm , en particular en el intervalo entre 45 μm y 100 μm (en comparación, un retardador de cuarto de onda de cuarzo a 1310 nm tiene un grosor de 39 μm , como se ha mencionado más arriba). El retardador de cuarto de onda QWR se fija en el rebaje, por ejemplo, por medio de una capa 25 de adhesivo blando, tal como una silicona blanda, acrilato, acrilato de uretano o una capa de adhesivo con una temperatura de transición vítrea inferior a $-40\text{ }^\circ\text{C}$. Por lo tanto, el retardador de cuarto de onda QWR permanece libre de esfuerzos dentro de un intervalo amplio de temperaturas, en particular en un intervalo de $-40\text{ }^\circ\text{C}$ a $85\text{ }^\circ\text{C}$.
25 Contrariamente a los dispositivos convencionales [5, 6], el retardador está rígidamente encolado entre el soporte de fibra y el chip divisor y, por lo tanto, es propenso a la birrefringencia inducida por esfuerzos.

Ventajosamente, las capas de adhesivo blando 25 están situadas a ambos lados del retardador de cuarto de onda QWR. Ventajosamente, el grosor de cada capa de adhesivo 25 mide al menos 1 μm .

30 El rebaje 22 con el retardador puede estar situado en el canal de fuente, es decir, en el puerto PT1 de entrada del lado de optoelectrónica, o en los dos canales de detector, es decir, en los puertos PT2, PT3 de salida del lado de optoelectrónica.

35 Sin embargo, la ubicación del retardador en el canal de fuente entre el puerto PT1 de entrada del lado de optoelectrónica y la unión del lado de detección junto al puerto PT1 de entrada del lado de optoelectrónica, es decir, la unión J1 en la realización de la Figura 4, resulta ventajosa. En contraste con una ubicación en los dos canales de detector (véase la Figura 2), las perturbaciones residuales del sesgo de fase o el acoplamiento cruzado entre los estados ortogonales de polarización debido a los esfuerzos residuales son entonces un modo común para ambas señales detectadas, es decir, esta elección para la posición del retardador reduce la influencia de los esfuerzos sobre la salida final del sensor.

40 En la Figura 5 se muestra otra modificación del divisor conforme a la presente invención. La modificación es en gran medida equivalente a la de la Figura 4, pero el puerto PT5 del lado de detección ha sido movido ahora hacia el borde opuesto del chip del divisor 8 de haz, es decir, está ubicado (como se ve a lo largo de la dirección Y) en el lado opuesto del retardador de cuarto de onda QWR. Nuevamente, el puerto PT5 del lado de detección está desplazado lateralmente a lo largo de la dirección Y en una distancia al menos a con respecto al puerto más cercano (PT3 en este caso) de la primera faceta 22. Esta modificación tiene la ventaja de que el rebaje 24 para el retardador QWR tiene menos profundidad (a lo largo de la dirección lateral Y). Por lo tanto, se proporciona más área de superficie en la primera faceta 22 para encolar el soporte 20 de fibra al divisor 8 de haz (suponiendo anchos de chip similares).
45 Constituye un inconveniente el mayor desplazamiento lateral de la sección W5 de guía de onda con respecto a la unión J1 y, por lo tanto, una mayor longitud de divisor a lo largo de la dirección X, si se mantienen iguales los radios de guía de onda.

50 La Figura 6 muestra otro divisor 8 de haz según la presente invención. La modificación comprende un divisor PLC convencional 1×4 , de nuevo complementado con óptica de analizador para su uso en un sensor polarimétrico de corriente. En esta realización existe un puerto PT1 de entrada del lado de optoelectrónica y tres puertos PT2 - PT4 de salida del lado de optoelectrónica, mientras que sigue existiendo un único puerto PT5 del lado de detección.

55 En esta realización, el divisor 8 de haz comprende una primera unión J1, una segunda unión J2 y una tercera unión J3. La primera unión J1 divide luz procedente del puerto PT5 del lado de detección entre la segunda y tercera uniones J2, J3, mientras que la segunda unión J2 divide luz procedente de la primera unión J1 entre el segundo

puerto PT3 de salida de la cara de optoelectrónica y un tercer puerto PT4 de salida del lado de optoelectrónica. La tercera unión J3 divide luz procedente de la primera unión J1 entre el puerto PT1 de entrada del lado de optoelectrónica y el primer puerto PT2 de salida del lado de optoelectrónica.

5 A diferencia de un chip divisor PLC 1×3 (Figura 2), las uniones J1, J2, J3 de guía de onda son simétricas (todas con una relación de división 1:1).

10 Con la excepción de la unión J1, que es la más cercana al puerto PT5 del lado de detección, ninguna de las uniones está alineada con un puerto de guía de onda a fibra (la unión J1 está alineada con la PMF, pero no con ninguno de los puertos PT1, PT2, PT3, PT4 del lado de optoelectrónica). Por lo tanto, tampoco la PMF está alineada con ninguna de las SMF de los canales de detector. Así pues, el divisor de polarización 1×4 también reduce sustancialmente la influencia de la luz parásita en comparación con un divisor de polarización 1×3 del estado de la técnica. Téngase en cuenta que las señales de los canales 2 y 3 son equivalentes. Uno de los dos canales puede servir como canal de reserva. Como alternativa, si el polarizador P1 cubre los canales Ch1 y Ch2 y el polarizador P2 cubre los canales Ch3 y Ch4, las señales de los canales Ch3 y Ch4 son equivalentes.

15 Un pequeño inconveniente de un divisor de polarización 1×4 si se compara con un divisor de polarización 1×3 reside en que, para una fuente luminosa dada, la potencia óptica que llega a los fotodetectores es menor en un factor (teórico) de 1,74.

20 En lugar de un divisor (de polarización) con óptica integrada 1×3 o 1×4 , se puede emplear un divisor (de polarización) con óptica integrada $M \times N$ (con $M = 1, 2, \dots$, en particular $M = 1$, y $N = 5, 6, 7, \dots$). Esto permite conectar al menos a dos, en particular al menos cuatro, puertos de salida del lado de optoelectrónica con el fin de proporcionar al menos dos señales redundantes indicativas del mensurando. Estas señales redundantes se generan típicamente en al menos dos módulos de optoelectrónica o unidades 1 de electrónica de sensor separadas. Por ejemplo, se puede preparar un divisor 1×6 para que proporcione dos pares de señales de detector equivalentes y una señal de reserva (o tres pares de señales de detector equivalentes, si también se utiliza la señal que retorna a través de la fibra del canal de fuente). Esto permite hacer funcionar un cabezal de sensor con varias unidades redundantes de unidades 1 de electrónica de procesamiento de señal o enviar las señales a electrónica en distintas ubicaciones.

30 En principio, en lugar de colocar el retardador de cuarto de onda QWR en un rebaje 24 en la primera faceta 22, el divisor 8 de haz puede estar equipado con una hendidura 26 para recibir el retardador QWR, como se muestra en la Figura 7. El retardador QWR está encolado en la hendidura 26, con un adhesivo blando 25 en al menos un lado, ventajosamente en ambos lados. El grosor (en la dirección X) de cada capa de adhesivo es de nuevo ventajosamente al menos $1 \mu\text{m}$.

Sin embargo, esta disposición es menos preferida, ya que la luz no guiada antes de la hendidura 26 puede acoplarse, junto con la luz guiada, a la guía de onda después de la hendidura y dar lugar nuevamente a efectos de interferencia no deseados.

35 *Prestaciones*

Tal como se explica en la Ref. 5, en caso de medir corriente alterna se puede utilizar la variación del sesgo de fase frente a la temperatura como una medida de la temperatura en la ubicación del divisor y del arrollamiento de fibra. El sesgo de fase se obtiene de la diferencia filtrada por paso bajo de las dos señales de detector, dividida por su suma (lo que se denomina en la presente memoria desplazamiento de CC normalizado).

40 En este contexto, "filtrado por paso bajo" designa un promedio de las señales a lo largo de una pluralidad de períodos de un mensurando periódico, por ejemplo una señal de corriente o tensión periódicas.

45 Así pues, se puede compensar cualquier dependencia de la temperatura residual del sensor. Es obvio que un retardador esencialmente libre de esfuerzos constituye un prerrequisito para este método. Solo la birrefringencia natural dependiente de la temperatura del retardador determina entonces el sesgo de fase, pero no la birrefringencia inducida por los esfuerzos.

50 La Figura 8 muestra la variación del desplazamiento de CC normalizado de un sensor con un divisor 8 de haz tal como se describe en la presente memoria, en función de la temperatura del divisor de haz. Resulta obvio que el desplazamiento de CC (es decir, el sesgo de fase) varía linealmente con la temperatura y está libre de esfuerzos u otros efectos perturbadores. La temperatura se puede deducir del desplazamiento de CC con una precisión de aproximadamente $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

55 Por lo tanto, en términos más generales se puede emplear el dispositivo de sensor para determinar la temperatura en la placa de cuarto de onda QWR si se mide la diferencia entre las señales de los detectores de luz PD1, PD2 en ausencia de un desplazamiento de fase en dicho elemento de detección (por ejemplo, para corriente o tensión cero en un detector de corriente o de tensión) o bien se puede deducir de valores filtrados por paso bajo de dichas señales a lo largo de varios períodos de un mensurando periódico.

La Figura 9 muestra la señal del sensor en función de la temperatura del divisor, para una corriente aplicada constante después de la compensación de temperatura. La variación de la señal está dentro de $\pm 0,1\%$ a lo largo de un intervalo de temperatura desde ± 40 °C hasta 80 °C, es decir, el sensor es adecuado para mediciones con precisión de clase 0,2. Como comparación, en divisores de haz no optimizados del estado de la técnica se pueden producir perturbaciones de señal de varias décimas de punto porcentual.

Ventajas

Como consecuencia de las técnicas descritas en la presente memoria, se puede exponer el divisor 8 de haz de polarización (denominado en general "divisor" en la presente memoria) a un amplio intervalo de temperaturas (por ejemplo, de -40 °C a 85 °C). Así pues, el divisor 8 de haz de polarización no necesita ningún control de temperatura [6] y puede colocarse, junto con el arrollamiento de fibra de detección, en una carcasa común (nota: la técnica, por supuesto, también resulta beneficiosa para los divisores en un entorno con temperatura controlada). Algunas ventajas importantes que resultan de esta disposición son las siguientes:

- El enlace de fibra entre el módulo de optoelectrónica (que se encuentra habitualmente en la caseta de control de la subestación o en un cubículo exterior calentado) y la carcasa del arrollamiento de fibra se compone de fibras monomodo estándar (la corta sección de fibra mantenedora de polarización entre el divisor y el arrollamiento se encuentra dentro de la carcasa del cabezal de sensor). Por el contrario, un divisor que requiera control de temperatura debe ser colocado en el módulo 1 de optoelectrónica o en un recinto separado, a potencial de tierra, en algún lugar entre el módulo 1 de optoelectrónica y el arrollamiento de fibra en alta tensión. En este caso, al menos parte del enlace de fibra ha de ser mantenedor de la polarización, lo que aumenta la complejidad y añade un coste sustancial.
- Además, la ausencia de un enlace mantenedor de la polarización hace al sensor menos propenso a esfuerzos mecánicos sobre la fibra. Tales esfuerzos se pueden producir, por ejemplo, en los conectores de fibra (si los hay) o en los pasamuros de fibra, en caso de que el sensor esté integrado, por ejemplo, en un interruptor de circuito [12, 13] o en un aislante de alta tensión.
- El enlace de fibra puede tener conectores de fibra monomodo estándar y no necesita conectores mantenedores de la polarización, que son exigentes y costosos.
- Además, un enlace de fibra estándar puede ser mucho más largo que un enlace mantenedor de la polarización; > 10 km frente a < 500 m.
- La opción de utilizar cables de fibra largos permite medir la corriente en ubicaciones remotas sin una fuente cercana de alimentación eléctrica. Una aplicación correspondiente es la "protección de línea mixta". En este caso, se mide la corriente en la transición desde la línea eléctrica aérea a un cable de alimentación subterráneo. Estas ubicaciones pueden estar a muchos kilómetros de la subestación más cercana.

Notas

Como se ha mencionado más arriba, las guías de onda del divisor 8 de haz pueden ser birrefringentes, dependiendo la magnitud de la birrefringencia de los procedimientos de fabricación. Por ejemplo, el retardo de fase en un paso único puede corresponder a 150 grados para un divisor con una longitud de 10 mm. Se pueden fabricar guías de onda altamente birrefringentes si se confiere a las guías de onda una forma elíptica. En este caso, se puede elegir de manera diferente la birrefringencia en los caminos de ida y de retorno (diseñando adecuadamente la máscara para la fabricación de la guía de onda) de manera que la diferencia corresponda a 90° (o a $90^\circ + n \cdot 180^\circ$, con $n = 1, 2, 3, \dots$), con una tolerancia de, por ejemplo, $\pm 10^\circ$, en particular $\pm 5^\circ$. Entonces se puede omitir el retardador de cuarto de onda adicional para inducir el sesgo de fase.

En términos más generales, las secciones de guía de onda del divisor 8 de haz son ventajosamente birrefringentes e inducen un desplazamiento de fase de $90^\circ + n \cdot 180^\circ$, siendo n cero o un número entero positivo, entre los dos modos de polarización de la luz que pasa desde el puerto PT1 de entrada del lado de optoelectrónica al puerto PT5 del lado de detección y retorna, con direcciones de polarización intercambiadas, a uno de los puertos PT2 - PT4 de salida del lado de optoelectrónica.

En caso de guías de onda birrefringentes, la birrefringencia (faltante) del rebaje da como resultado una contribución adicional (dependiente de la temperatura) al sesgo de fase de las ondas luminosas ortogonales. Dependiendo de la orientación relativa del eje lento del retardador y de las guías de onda, la contribución adicional se suma al retardo del retardador o se resta del mismo. Esto se puede utilizar para intensificar o reducir la dependencia del sesgo de fase con respecto a la temperatura.

Las mejoras en el divisor conforme a la presente invención incluyen tanto un nuevo diseño de guía de onda para suprimir la luz parásita como un rebaje o hendidura en el divisor de haz para montar sin esfuerzos el retardador. En principio, también son concebibles divisores de haz de polarización (o, abreviadamente, divisores de haz o divisores) en los que solo se implemente una de las dos medidas.

Tal como se menciona en la Ref. 6, las facetas finales 22, 23 del divisor pueden estar pulidas en ángulo (por ejemplo, formando 8° con respecto a la normal al plano de guías de onda) con el fin de reducir los reflejos hacia atrás. Esto puede aplicarse solamente a una faceta (por ejemplo, la faceta de PMF) o a ambas facetas.

El divisor 8 de haz comprende un sustrato y las secciones de guía de onda y uniones integradas en el mismo.

- 5 Típicamente, el sustrato del divisor está constituido por vidrio. No obstante, también se pueden concebir divisores basados en polímero [14, 15] o sustratos cristalinos, por ejemplo Si o InP [16, 17].

Como una alternativa al intercambio de iones, las guías de onda del divisor también se pueden producir mediante escritura con láser directa [18] o tecnología de silicio sobre aislante (SOI, por sus siglas en inglés).

- 10 Los polarizadores de película delgada pueden tener un lado (o superficie) activo en donde se concentran las partículas polarizantes. En este caso, el lado activo está ventajosamente encarado hacia el divisor 8 de haz. Por lo tanto, la posible birrefringencia en el cuerpo de las láminas del polarizador (por ejemplo, a causa del encolado) no puede afectar a la diferencia de fase entre los dos modos ortogonales de polarización.

- 15 En términos más generales, si los polarizadores tienen un primer lado que presenta una absorción anisotrópica (dependiente de la polarización) más intensa que un segundo lado, ventajosamente el primer lado debería estar encarado hacia el divisor 8 de haz.

En lugar de las fibras monomodo SMF 2 y SMF 3 se pueden utilizar fibras multimodo. Gracias al mayor tamaño del núcleo (por ejemplo, 62,5 μm en lugar del núcleo de 9 μm de una SMF), se reducen las pérdidas por acoplamiento de las guías de onda SC hacia las fibras.

- 20 Ventajosamente, están presentes despolarizadores de fibra de tipo Lyot en los dos canales de detector después de los polarizadores P1, P2, para evitar la pérdida dependiente de la polarización en el camino hacia los fotodetectores. Tal pérdida podría aumentar la sensibilidad hacia perturbaciones mecánicas de las fibras. Los despolarizadores de fibra de tipo Lyot constan de dos secciones de PMF con sus ejes lentos a 90° y una relación de longitudes 2:1. En lugar de un despolarizador de fibra Lyot, se puede utilizar solamente una única sección de PMF (es decir, una fibra birrefringente) en cada canal de detector que esté conectada mediante casquillo en espiral al dispositivo 5
- 25 divisor de haz con un eje principal formando 45° (con tolerancias de +/- 10°, en particular +/- 5°) con las direcciones de polarización de los polarizadores P1, P2. La longitud de la sección de PMF se elige de manera que el retardo de grupo birrefringente sea mayor que la longitud de coherencia de la fuente luminosa. Típicamente, una sección de fibra con una longitud de al menos 10 cm, en particular al menos 20 cm, cumple este requisito. En la Figura 10 se muestra un conjunto correspondiente de fibras birrefringentes 27, 28.

- 30 Debe señalarse que la invención no solamente es aplicable a la configuración de sensor descrita en lo que antecede, sino a diversas modificaciones. La Figura 10 muestra una versión de sensor que trabaja con luz polarizada linealmente en el arrollamiento de fibra en lugar de dos ondas luminosas (incoherentes) polarizadas circularmente. Tanto el divisor de polarización como el arrollamiento de fibra carecen de un retardador de cuarto de onda. Se supone que las guías de onda del divisor están libres de birrefringencia. El polarizador P1 polariza la luz
- 35 procedente de la fuente. La luz polarizada realiza un viaje de ida y vuelta a través del arrollamiento de fibra y vuelve a los polarizadores P2, P3 del canal de detector. Los polarizadores P2, P3 están alineados a ± 45° con respecto a P1. La fibra de detección está directamente conectada mediante casquillo en espiral al divisor de polarización. Nuevamente, las dos señales S1, S2 de detector vienen dadas por las ecuaciones 1, 2, con la diferencia de que el término $\Delta\phi$ es ahora el ángulo en el cual ha rotado la polarización en el arrollamiento de fibra a consecuencia del efecto Faraday: $\Delta\phi = 2VNI$. Al igual que antes, el reflector es simplemente un revestimiento reflectante en el extremo
- 40 de la fibra. Como alternativa, el reflector puede ser un espejo rotador de Faraday de 45°. Un doble paso de la luz a través del dispositivo rota 90° la polarización. De este modo se compensa, al menos parcialmente, la perturbación de la birrefringencia lineal sobre la fibra de detección, por ejemplo en el soporte de fibra del divisor.

- 45 En otra versión del sensor, la luz que retorna al divisor de polarización puede ser dividida hacia tres canales de detector. El polarizador del tercer canal es paralelo al polarizador del canal de fuente. El tercer canal sirve como medida para el contraste marginal, tal como se describe en la Ref. 5.

- Además, debe señalarse que el divisor de polarización no solamente es adecuado para su uso en un sensor óptico de corriente, sino que también puede utilizarse en otros tipos de sensores en donde el mensurando produzca un desplazamiento diferencial de fase entre modos ortogonales de polarización. Constituye un ejemplo de ello un
- 50 sensor óptico de tensión tal como el descrito en la Ref. 6, en donde una tensión aplicada a un cristal electroóptico genera el desplazamiento diferencial de fase.

- En las realizaciones expuestas en lo que antecede, el desplazamiento entre los puertos del lado de optoelectrónica utilizados y el puerto del lado de detección se produce a lo largo de la dirección Y. Sin embargo, para un divisor de haz cuyos segmentos de guía de onda estén dispuestos en tres dimensiones, y no solamente en un único plano, el
- 55 desplazamiento también se puede producir a lo largo de una dirección perpendicular a la superficie del divisor de haz. Esto se aplica asimismo a los desplazamientos entre las uniones de guía de onda y los puertos del lado de optoelectrónica y el puerto del lado de detección.

Aunque se han mostrado y descrito realizaciones actualmente preferidas de la invención, debe entenderse claramente que la invención no está limitada a las mismas, sino que, al contrario, puede ser realizada y puesta en práctica de diversas maneras dentro del alcance de las reivindicaciones siguientes.

Referencias citadas

- 5 1. G. Frosio y R. Dändliker, "Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor" (Interferómetro de reflexión recíproca para un sensor Faraday de corriente por fibra óptica); Appl. Opt. 33(25), 6111-6122, 1994.
- 10 2. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring y H. Brändle, "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor" (Sensor de corriente por fibra óptica insensible a la temperatura y la vibración), Journal of Lightwave Technology, vol. 20, págs. 267-276, 2002.
3. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H. Brändle y M. G. Brunzel, "Fiber-optic current sensor for electro-winning of metals" (Sensor de corriente por fibra óptica para la electroobtención de metales), J. Lightw. Technol. 25(11), 3602, 2007.
4. "The fiber-optic gyroscope" (El giroscopio de fibra óptica), Herve Lefevre, Artech House, Boston, Londres, 1993.
- 15 5. WO2007/121592A1, "Fiber-optic current sensor with polarimetric detection scheme" (Sensor de corriente por fibra óptica con esquema de detección polarimétrico). Inventores: K. Bohnert, A. Frank, H. Brändle.
6. WO2015/090448A1, "Optical sensors" (Sensores ópticos). Inventores: K. Bohnert, A. Frank, G. Müller, L. Yang.
7. K. Kurosawa *et al.*, "Flexible fiber Faraday effect current sensor using flint glass fiber and reflection scheme" (Sensor de corriente de efecto Faraday con fibra flexible que utiliza fibra de vidrio *flint* y esquema de reflexión", IEICE Trans. Electron. E83C, 326, 2000.
- 20 8. WO2014/006121, "Temperature-compensated fiber-optic current sensor" (Sensor de corriente por fibra óptica con compensación de temperatura). Inventores: G. Müller, A. Frank, K. Bohnert, X. Gu.
9. Norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), IEC60044-8, Transformadores de medida - Parte 8: Transformadores electrónicos de corriente.
- 25 10. K. Forrest *et al.*, "Channel waveguides in glass via silver-sodium field assisted ion exchange" (Canales de guía de onda en vidrio a través de intercambio de iones plata-sodio asistido por campo", J. Lightw. Technol. LT-4 (2), 140, 1986.
11. M. Izutsu *et al.*, "Operation mechanism of the single-mode optical waveguide y-junction" (Mecanismo de funcionamiento de la unión en Y de guías de onda ópticas monomodo", Opt. Lett. 7(3), 136, 1982.
- 30 12. WO2008/080878A1, inventores: U. Akesson, D. Andersson, L. Sköld, Y. Petersson, "Circuit breaker" (Disyuntor de circuito).
13. US 6 608 481 B1, inventores: C. Piazza, E. Centenaro, K. Bohnert, P. Gabus, H. Brändle, R. Cameroni, "Pole of a circuit breaker with an integrated optical current sensor" (Polo de un disyuntor de circuito con un sensor de corriente con óptica integrada).
- 35 14. V. Prajzler *et al.*, "Design and modeling of symmetric three branch polymer planar optical power dividers" (Diseño y modelado de divisores de potencia óptica planos de polímero con tres ramas simétricas", Radioengineering 22(1), 233, 2013.
15. M.-C. Oh *et al.*, "Polymer waveguide integrated-optic current transducers" (Transductores de corriente con óptica integrada de guía de onda de polímero", Opt. Express 19(10), 9392, 2011.
- 40 16. Y. Xu, "Proposal for compact polarization splitter using asymmetrical three-guide directional coupler" (Propuesta de divisor de polarización compacto que utiliza acoplador direccional de tres guías asimétrico", IEEE Photon. Technol. Lett. 27(7), 782, 2015.
17. L. Han *et al.*, "A high extinction ratio polarization beam splitter with MMI couplers on InP substrate" (Un divisor de haz de polarización con alta relación de extinción dotado de acopladores MMI sobre sustrato InP", IEEE Photon. Technol. Lett. 27(7), 782, 2015.
- 45 18. M. Beresna, M. Gecevicius y P. G. Kazansky, "Ultrafast laser direct writing and nanostructuring in transparent materials" (Escritura directa y nanoestructuración ultrarrápidas con láser en materiales transparentes), Advances in Optics and Photonics 6, 293-339 (2014).

Lista de números de referencia

	1:	unidad de electrónica de sensor / módulo de optoelectrónica
	2:	cabezal de sensor
	3:	fibras
5	4:	fuentes luminosa
	5:	dispositivo divisor de haz
	7:	espaciador
	8:	divisor de haz con óptica integrada
	9:	casquillo en espiral de PMF
10	10:	retardador
	11:	fibra de detección
	12:	conductor
	13:	reflector
	14:	guía de onda central
15	15, 16:	guías de onda externas
	17, 18:	uniones en Y
	19:	regiones centrales de luz parásita
	20, 21:	soporte de fibra
	22, 23:	primera y segunda facetas
20	24:	rebaje
	25:	adhesivo
	26:	hendidura
	27, 28:	fibras birrefringentes
	a:	espaciado entre fibras
25	Ch 1 ... Ch 4:	canales
	J1, J2, J3:	uniones
	P1, P2:	polarizadores
	PD1, PD2:	fotodetectores
	PT1, PT2, PT3, PT5:	puertos
30	QWR:	retardador de cuarto de onda
	SMF 1, SMF 2, SMF 3:	fibras monomodo
	W1, W2, ...:	secciones de guía de onda

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo de sensor óptico que comprende:

una fuente luminosa (4),

una primera fibra (SMF1), en donde luz procedente de dicha fuente luminosa (4) es acoplada a dicha primera fibra (SMF1),

un divisor (8) de haz con óptica integrada que tiene un puerto (PT1) de entrada del lado de optoelectrónica, un primer y un segundo puertos (PT2, PT3) de salida del lado de optoelectrónica y un puerto (PT5) del lado de detección, en donde luz que entra a dicho puerto (PT1) de entrada del lado de optoelectrónica es acoplada al menos parcialmente a dicho puerto (PT5) del lado de detección y luz que entra a dicho puerto (PT5) del lado de detección es dividida al menos parcialmente hacia dichos primer y segundo puertos (PT2, PT3) de salida del lado de optoelectrónica, y en donde dicha primera fibra (SMF1) está colocada de manera que envía luz a dicho puerto (PT1) de entrada del lado de optoelectrónica,

un elemento (10, 11, 13) de detección cuya birrefringencia cambia en función de un mensurando, en donde luz procedente de dicho puerto (PT5) del lado de detección es acoplada a dicho elemento (10, 11, 13) de detección, es reflejada y es acoplada de vuelta a dicho puerto (PT5) del lado de detección,

al menos una segunda fibra (SMF2) y una tercera fibra (SMF3), en donde luz procedente de dicho primer y dicho segundo puertos (PT2, PT3) de salida del lado de optoelectrónica es alimentada respectivamente a dichas segunda y tercera fibras (SMF2, SMF3),

detectores (PD1, PD2) de luz para medir la luz que sale de dichas segunda y tercera fibras (SMF2, SMF3),

en donde dicho divisor (8) de haz comprende

a) una pluralidad de secciones (W1 - W5) de guía de onda y uniones divisoras (J1 - J3), y

b) una primera y una segunda facetas (22, 23) en lados opuestos de dicho divisor (8) de haz con óptica integrada, en donde dicho puerto (PT1) de entrada del lado de optoelectrónica y dichos puertos (PT2 - PT4) de salida del lado de optoelectrónica están dispuestos en dicha primera faceta (22) y dicho puerto (PT5) del lado de detección está dispuesto en dicha segunda faceta (23),

en donde, en una dirección Y paralela a dicha primera faceta (22), dicho puerto (PT5) del lado de detección está desplazado, en un desplazamiento mínimo puerto-puerto distinto de cero, con respecto a dicho puerto (PT1) de entrada del lado de optoelectrónica y dichos primer y segundo puertos (PT2, PT3) de salida del lado de optoelectrónica,

caracterizado por que en dicha dirección Y, dicho puerto (PT5) del lado de detección está desplazado, en un desplazamiento mínimo unión-puerto distinto de cero, con respecto a cualquier unión (J1 - J3) que es atravesada por la luz procedente de dicho puerto (PT1) de entrada del lado de optoelectrónica en su camino hacia dicho puerto (PT5) del lado de detección.

2. El dispositivo de sensor según la reivindicación 1, en donde dicho divisor (8) de haz con óptica integrada tiene, en una dirección perpendicular a dicha primera faceta (22), una longitud L, y en donde dicho desplazamiento mínimo puerto-puerto mide al menos $L/20$, en particular al menos $L/10$.

3. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dicho desplazamiento mínimo puerto-puerto mide al menos $250 \mu\text{m}$.

4. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes en donde, en dicha dirección Y, dichos primer y segundo puertos (PT2 - PT3) de salida del lado de optoelectrónica están desplazados, en un desplazamiento mínimo unión-puerto distinto de cero, con respecto a cualquier unión (J1 - J3) que es atravesada por la luz procedente de dicho puerto (PT5) del lado de detección en su camino hacia cualquiera de dichos puertos (PT1 - PT3) de entrada o de salida del lado de optoelectrónica.

5. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones 3 o 4, en donde dicho desplazamiento mínimo unión-puerto mide al menos $D/20$, en particular al menos $D/10$, siendo D la distancia más larga desde cualquiera de dichas uniones (J1 - J3) a cualquiera de dichas facetas (22, 23).

6. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, en donde dicho desplazamiento mínimo unión-puerto mide al menos $125 \mu\text{m}$.

7. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dichas secciones (W1 - W5) de guía de onda son birrefringentes e inducen un desplazamiento de fase de $90^\circ + n \cdot 180^\circ$, siendo n cero o un número entero positivo, entre dos modos de polarización de luz que pasa desde dicho puerto (PT1) de entrada del

lado de optoelectrónica a dicho puerto (PT5) del lado de detección y, con polarizaciones intercambiadas, de vuelta a uno de dichos puertos (PT2 - PT4) de salida del lado de optoelectrónica.

8. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende:

5 un retardador de cuarto de onda (QWR) dispuesto entre al menos una de dichas fibras (SMF1, SMF2, SMF3) y el puerto (PT5) del lado de detección,

en donde dicho divisor (8) de haz comprende un rebaje (24) o hendidura (26), en donde dicho retardador de cuarto de onda (QWR) está dispuesto en dicho rebaje (24) o hendidura (26), y en donde una profundidad de dicho rebaje (24) o una anchura de dicha hendidura (26), respectivamente, es mayor que una anchura de dicho retardador de cuarto de onda (QWR), en particular mayor en al menos 1 μm .

10 9. El dispositivo de sensor según la reivindicación 8, en donde un lado de entrada y/o un lado de salida de dicho retardador de cuarto de onda (QWR) está bordeando una capa (25) de adhesivo transparente que tiene un grosor de al menos 5 μm y un módulo de Young de dicha capa de adhesivo es al menos menor en un factor de 10 que un módulo de Young de dicho retardador de cuarto de onda (QWR).

15 10. El dispositivo de sensor según la reivindicación 9, en donde dicha capa (25) de adhesivo es una silicona, un acrilato, un acrilato de uretano o una capa de adhesivo con una temperatura de transición vítrea por debajo de $-40\text{ }^\circ\text{C}$.

11. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende al menos un primer y un segundo polarizador (P1 - P3) dispuestos entre dichas fibras (SMF) y dicho puerto (PT1) de entrada del lado de optoelectrónica y dichos puertos (PT2 - PT4) de salida del lado de optoelectrónica.

20 12. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10 y según la reivindicación 11, en donde dicho retardador de cuarto de onda (QWR) está dispuesto en el rebaje (24) entre al menos uno de dichos polarizadores (P1 - P3) y dicho divisor (8) de haz con óptica integrada.

25 13. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones 11 o 12, en donde dichos polarizadores (P1 - P3) tienen un primer lado que tiene absorción anisotrópica más fuerte que un segundo lado, y en donde dichos polarizadores (P1 - P3) están dispuestos con dicho primer lado encarado a dicho divisor (8) de haz con óptica integrada.

30 14. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, que comprende además primera y una segunda fibras birrefringentes (27, 28) dispuestas entre dicha segunda y dicha tercera fibras (SMF2, SMF3) y dicho divisor (8) de haz con óptica integrada, en donde dichas fibras birrefringentes están dispuestas con ejes principales formando menos de 45° con respecto a una dirección de polarización de dichos polarizadores (P1 - P3), y en donde un retardo de grupo birrefringente de dichas fibras birrefringentes (27, 28) es mayor que una longitud de coherencia de la fuente luminosa (4).

35 15. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dicho elemento (10, 11, 13) de detección comprende un componente magnetoóptico o un componente electroóptico (11), y dicho dispositivo de sensor está adaptado para medir una corriente o una tensión.

40 16. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dicho divisor (8) de haz con óptica integrada comprende una primera unión (J1) y una segunda unión (J2), en donde dicha primera unión (J1) divide luz procedente de dicho puerto (PT5) del lado de detección entre dicho puerto (PT1) de entrada del lado de optoelectrónica y dicha segunda unión (J2), y en donde dicha segunda unión (J2) divide luz procedente de dicha primera unión (J1) entre dicho primer puerto (PT2) de salida del lado de optoelectrónica y dicho segundo puerto (PT3) de salida del lado de optoelectrónica.

17. El dispositivo de sensor según la reivindicación 16 en donde, a lo largo de dicha dirección Y,

- dicha primera unión (J1) está dispuesta entre, en particular en un centro entre, dicho puerto (PT1) de entrada del lado de optoelectrónica y dicho primer puerto (PT2) de salida del lado de optoelectrónica y/o

45 - dicha segunda unión (J2) está dispuesta entre, en particular en un centro entre, dicho primer y dicho segundo puertos (PT2, PT3) de salida del lado de optoelectrónica.

18. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones 16 o 17 y según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 14, en donde dicho retardador de cuarto de onda está dispuesto entre dicha primera fibra (SMF1) y dicha primera unión (J1).

50 19. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15, en donde dicho divisor (8) de haz comprende una primera unión (J1), una segunda unión (J2) y una tercera unión (J3), en donde dicha primera unión (J1) divide luz procedente de dicho puerto (PT5) del lado de detección entre dichas segunda y tercera uniones (J2, J3), y en donde dicha segunda unión (J2) divide luz procedente de dicha primera unión (J1) entre dicho segundo

puerto (PT3) de salida del lado de optoelectrónica y un tercer puerto (PT4) de salida del lado de optoelectrónica, y en donde dicha tercera unión (J3) divide luz procedente de dicha primera unión (J1) entre dicho puerto (PT1) de entrada del lado de optoelectrónica y dicho primer puerto (PT2) de salida del lado de optoelectrónica.

5 20. El dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde se utiliza un divisor con óptica integrada $M \times N$ con números enteros $M = 1, 2, \dots$, en particular $M = 1$, y $N = 5, 6, 7, \dots$, y proporciona al menos dos, en particular al menos cuatro, puertos de salida del lado de optoelectrónica para estar conectado a dos unidades (1) de electrónica de sensor separadas que generan al menos dos señales redundantes indicativas del mensurando.

10 21. Uso del dispositivo de sensor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes para determinar una temperatura en dicho retardador de cuarto de onda (QWR) o para corregir dicho mensurando a través de la medición de una diferencia entre señales normalizadas procedentes de dichos detectores (PD1, PD2) de luz, en donde dicha diferencia se mide en ausencia de un desplazamiento de fase en dicho elemento (10, 11, 13) de detección o se deriva de valores filtrados por paso bajo de dichas señales a lo largo de varios periodos de un mensurando periódico.

15

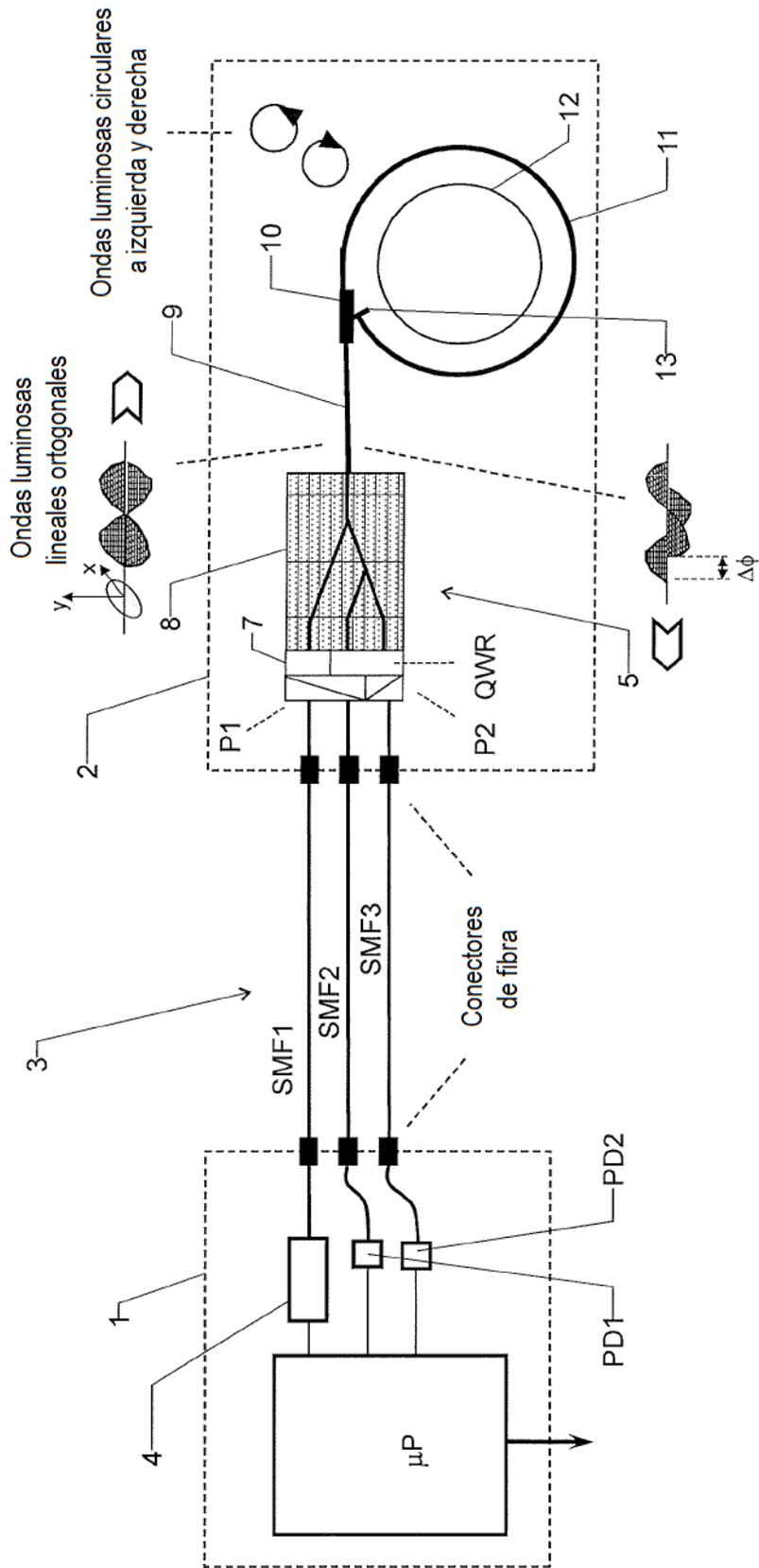


Fig. 1

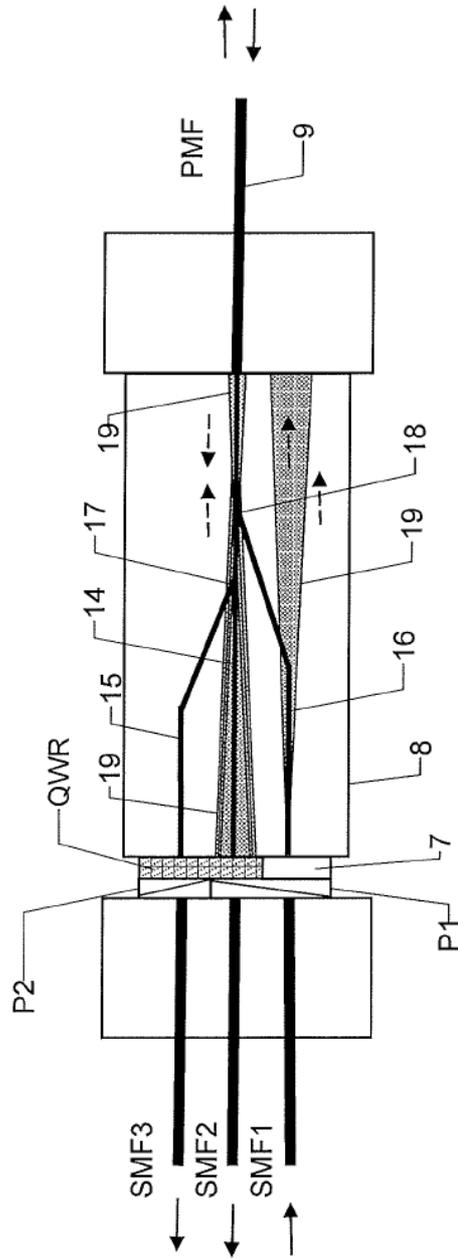


Fig. 2

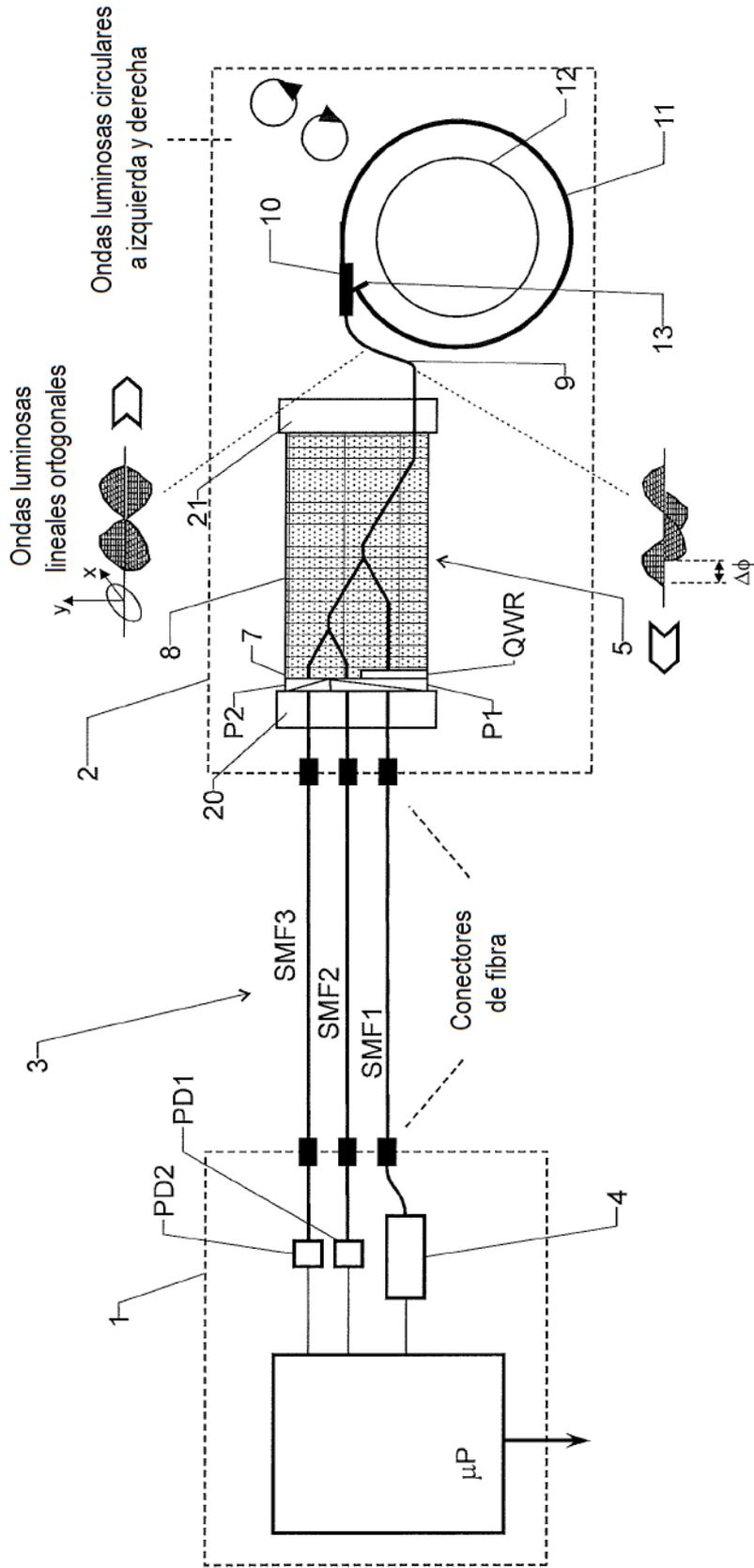


Fig. 3

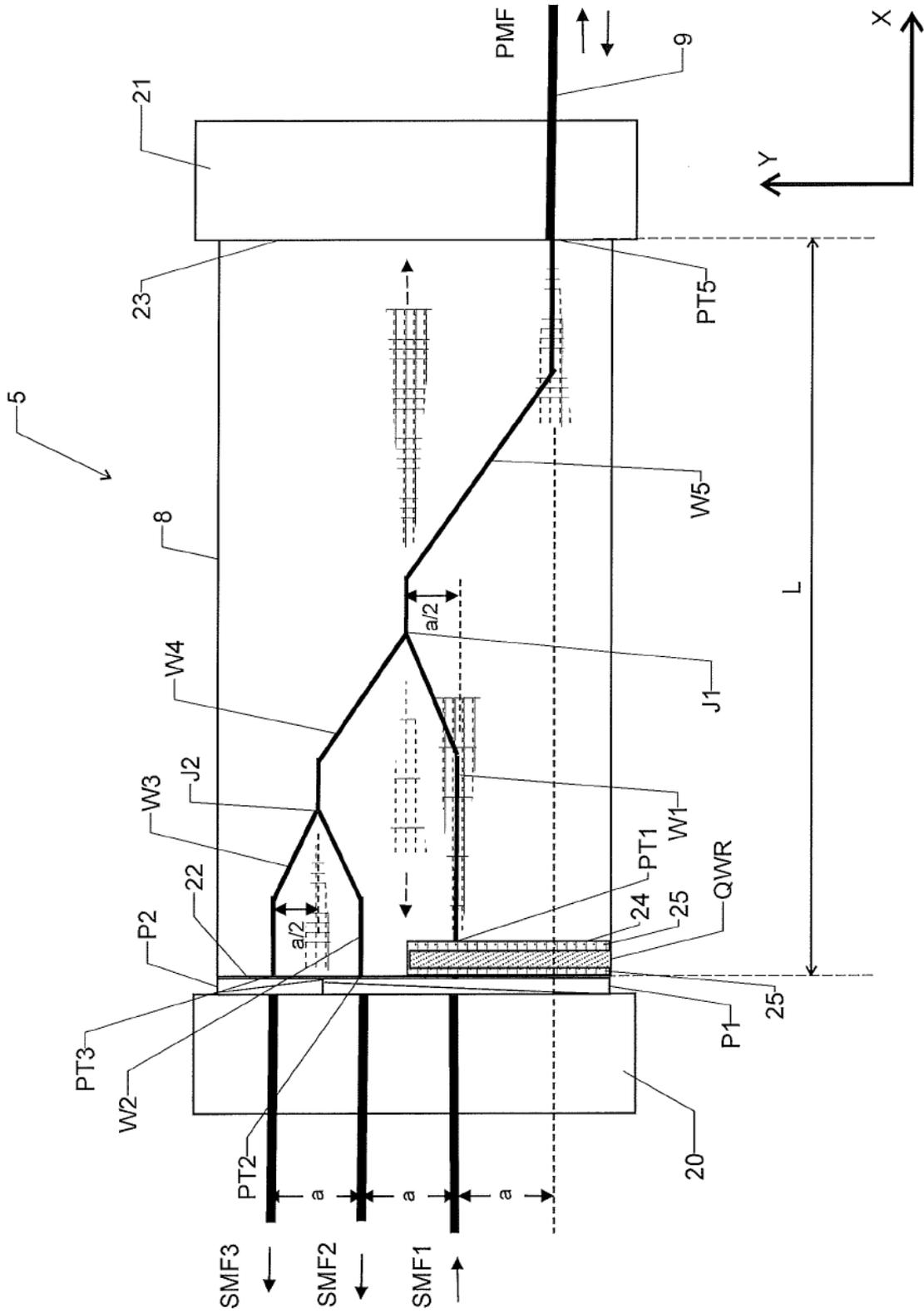


Fig. 4

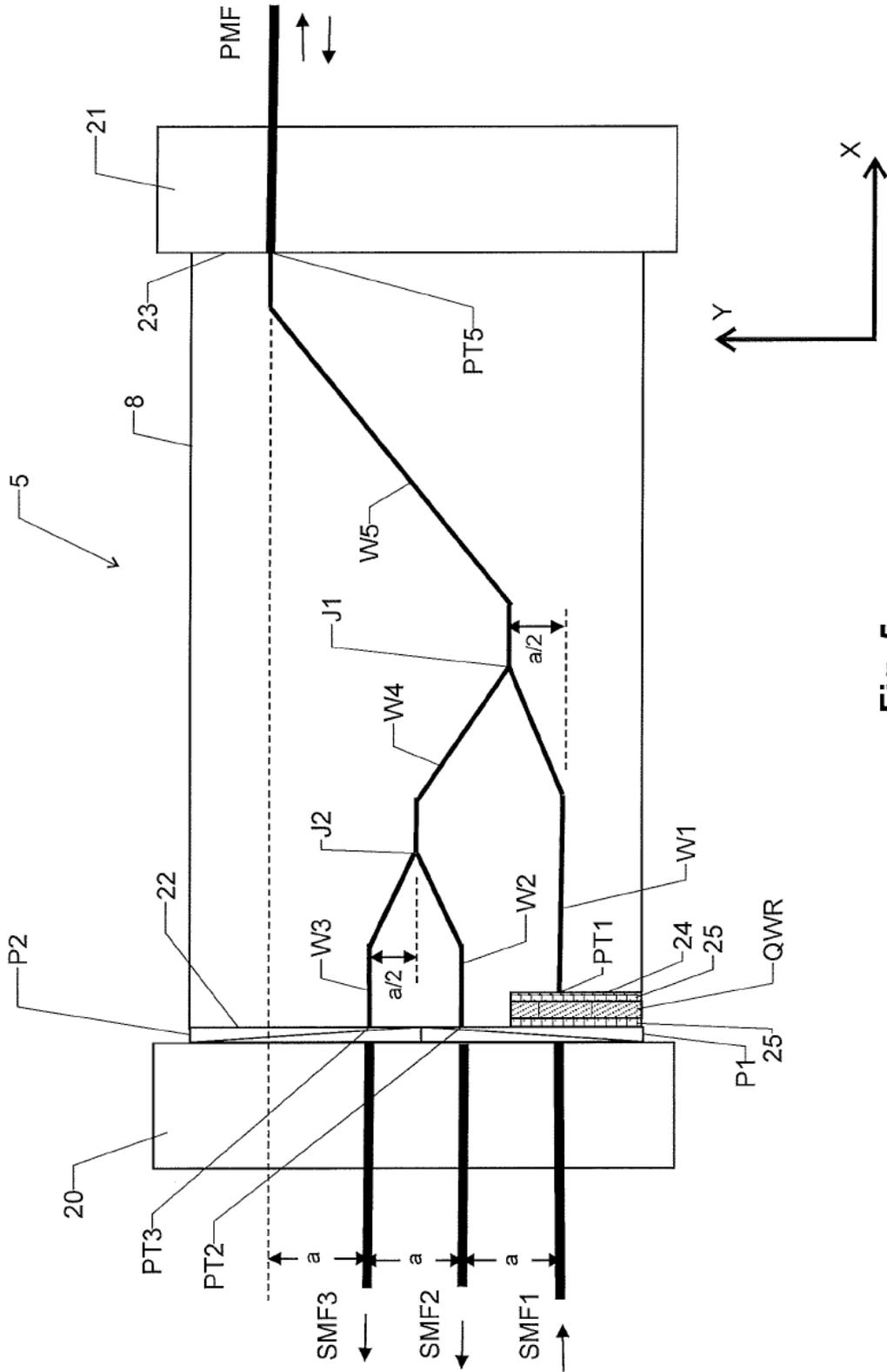


Fig. 5

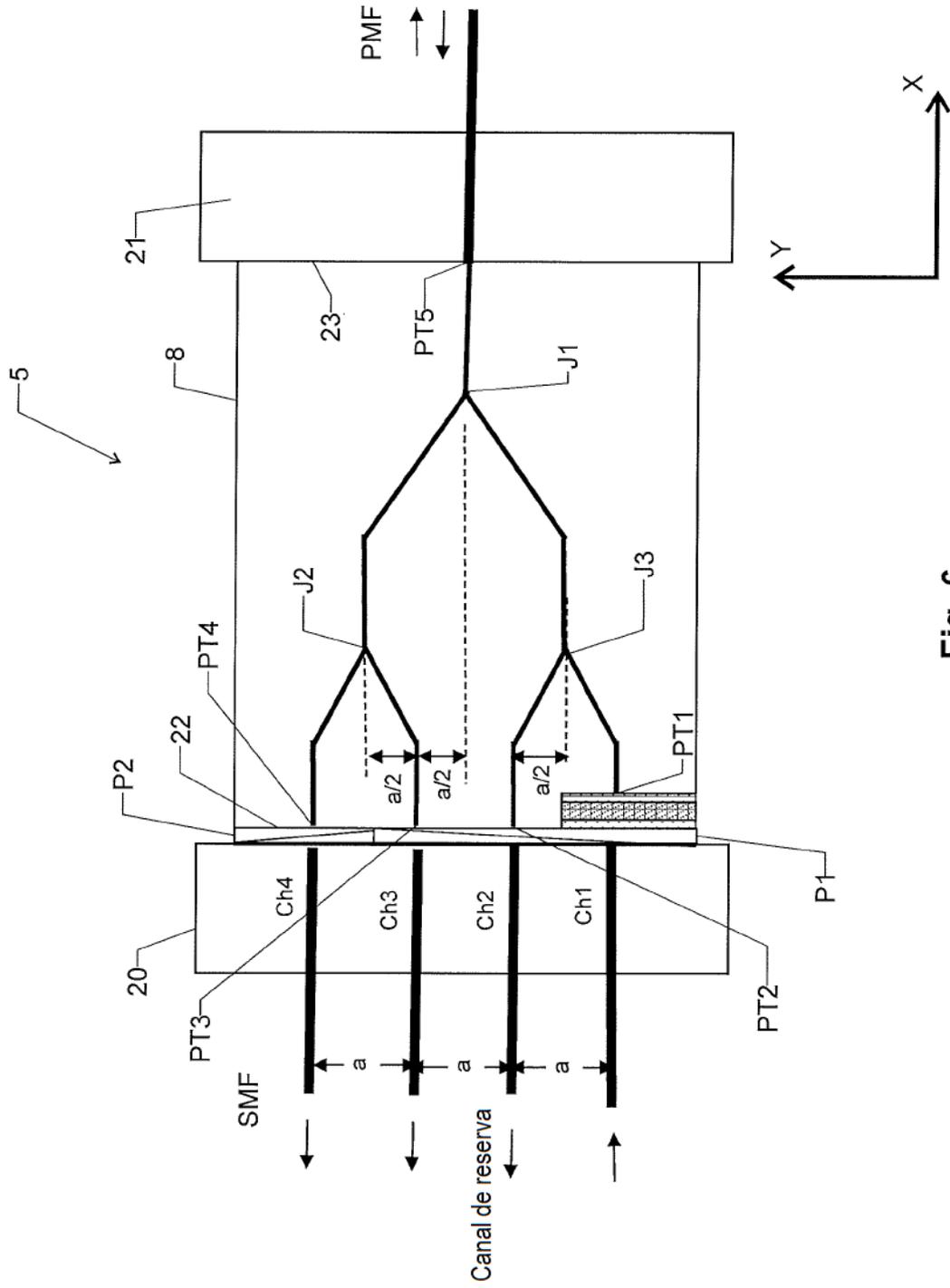


Fig. 6

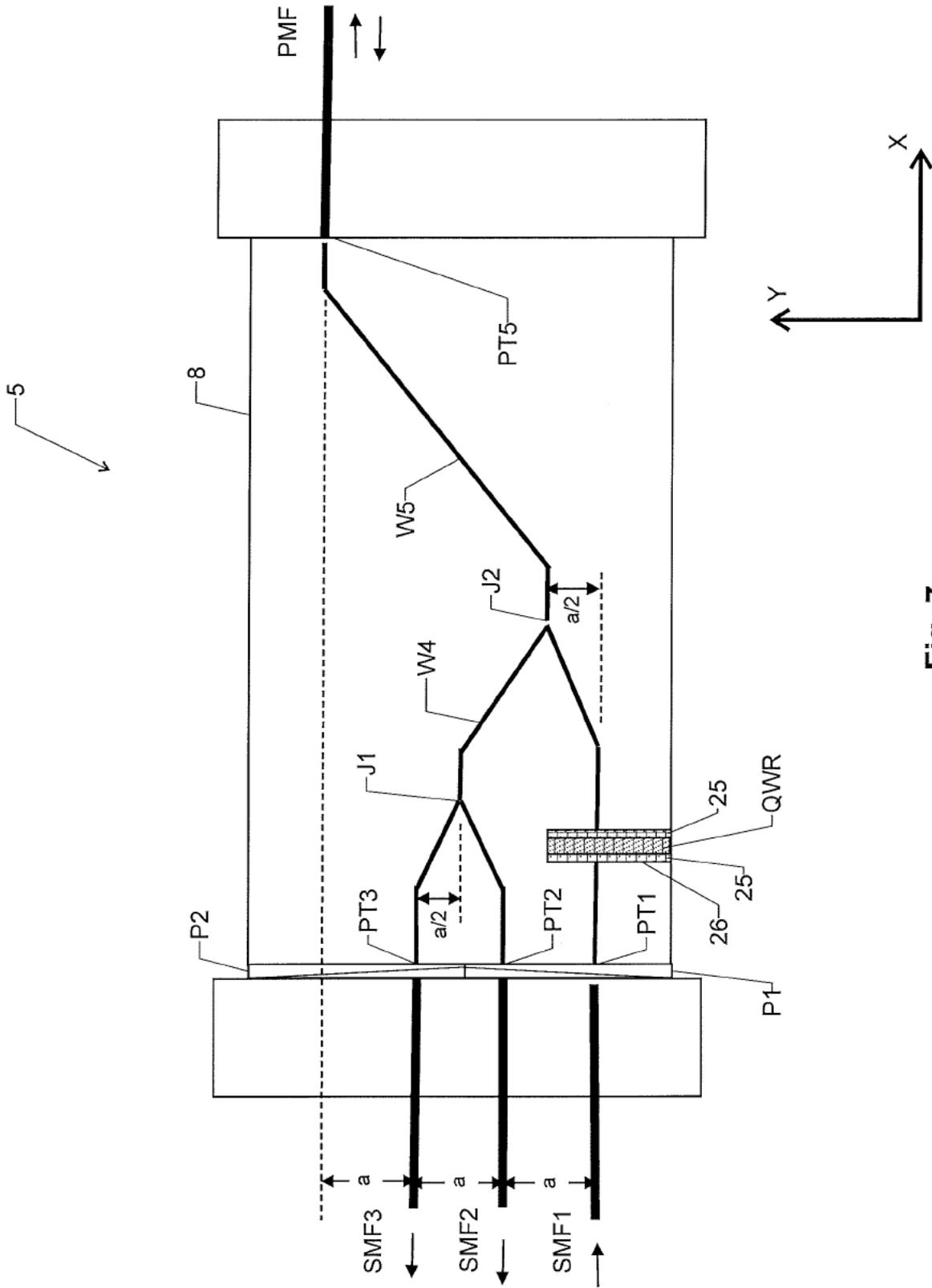


Fig. 7

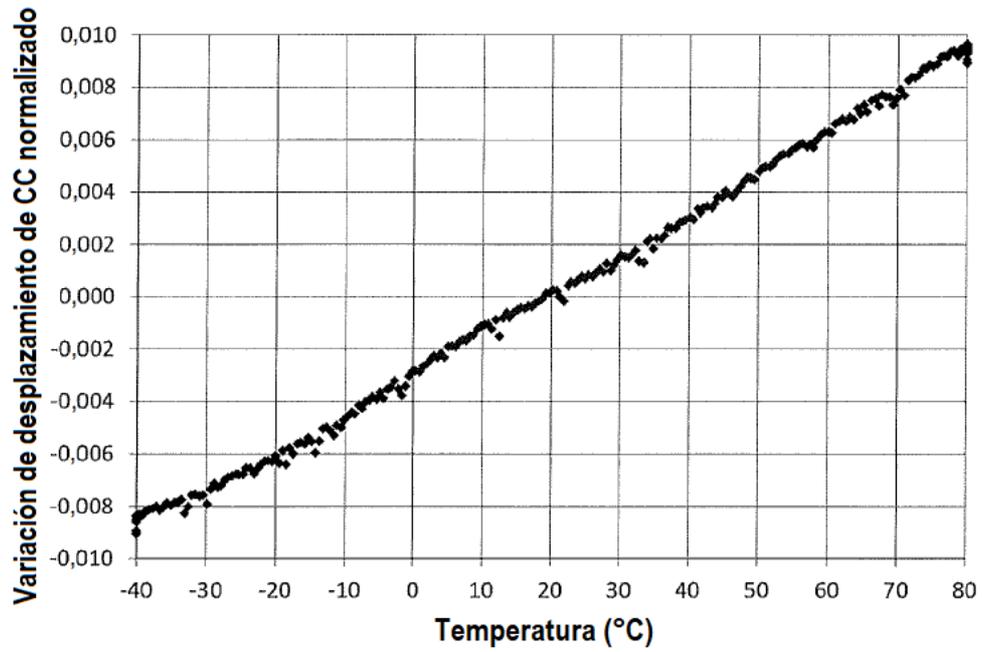


Fig. 8

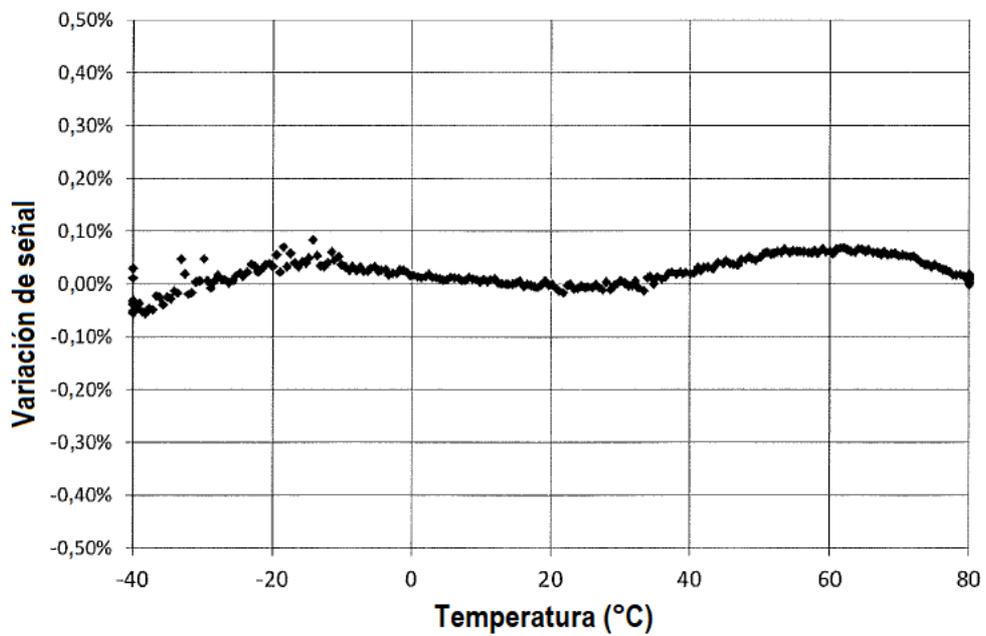


Fig. 9

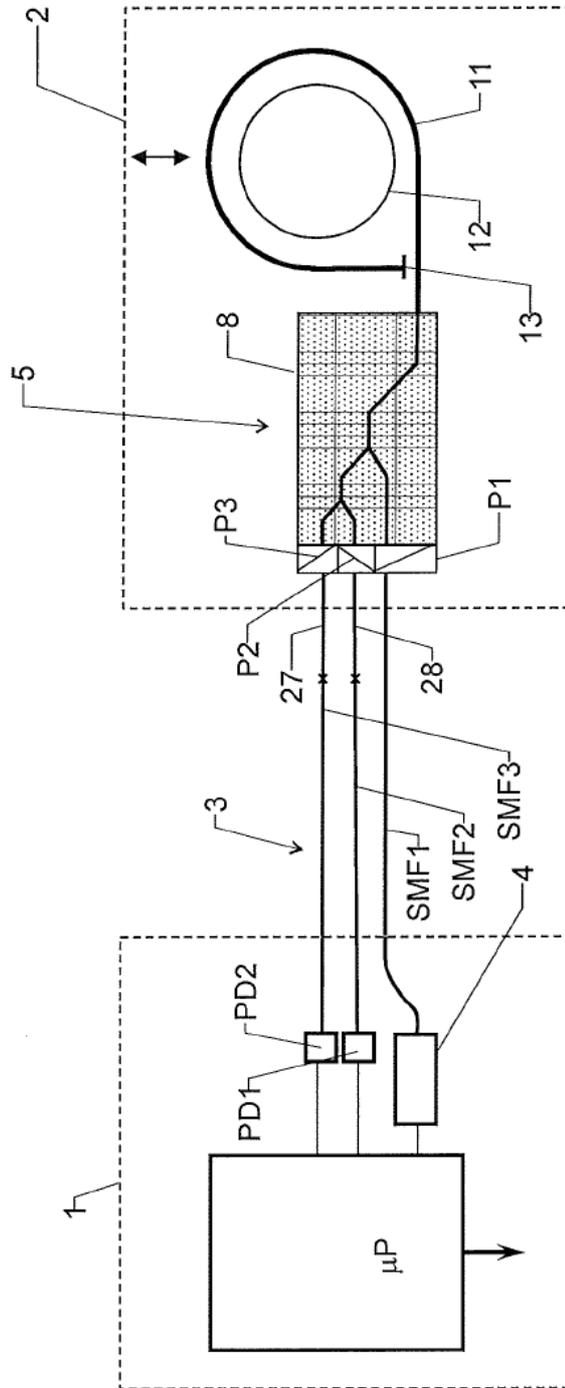


Fig. 10