

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 755 735**

51 Int. Cl.:

G01R 15/24 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.09.2016 PCT/EP2016/072933**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.04.2017 WO17063867**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.09.2016 E 16775168 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.08.2019 EP 3362802**

54 Título: **Sensor de corriente de fibra óptica con tolerancia a la desalineación del conector**

30 Prioridad:

14.10.2015 EP 15189760

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

23.04.2020

73 Titular/es:

**ABB SCHWEIZ AG (100.0%)
Brown Boveri Strasse 6
5400 Baden , CH**

72 Inventor/es:

**BOHNERT, KLAUS y
GABUS, PHILIPPE**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 755 735 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

Sensor de corriente de fibra óptica con tolerancia a la desalineación del conector

Campo técnico

5 La invención se refiere a sensores de corriente de fibra óptica, en particular para mediciones de corriente en subestaciones de alto voltaje para la transmisión de energía eléctrica y aplicaciones industriales.

Antecedentes de la técnica

10 Los sensores de corriente de fibra óptica (FOCS, por sus siglas en inglés) comúnmente explotan el efecto Faraday en una bobina de fibra de detección de sílice fundida, que incluye al conductor de corriente. En el pasado se investigó una gran variedad de esquemas de sensores. Una configuración de sensor empleada con frecuencia se conoce a partir de las Refs. [1, 2]. En la presente, dos ondas de luz polarizadas linealmente viajan desde un módulo optoelectrónico a través de una fibra de conexión que mantiene la polarización (PM, por sus siglas en inglés) a la bobina de fibra de detección, que funciona en modo de reflexión. Un retardador de cuarto de onda en la entrada de la bobina convierte las ondas en ondas circulares izquierdas y derechas. Las ondas circulares acumulan un cambio de fase diferencial magneto óptico proporcional a la corriente durante su ida y vuelta a través de la bobina. Luego, las ondas regresan al módulo optoelectrónico, nuevamente como ondas de luz polarizadas linealmente ortogonales, pero con direcciones de polarización intercambiadas en comparación con las ondas de propagación hacia adelante. El cambio de fase magneto óptico se mide en base a un esquema de detección conocido a partir de giroscopios de fibra [3]. El esquema implica una modulación de la fase diferencial de las dos ondas de luz, idealmente a una frecuencia correspondiente al doble del tiempo de ida y vuelta de las ondas de luz. El cambio de fase magneto óptico se deriva entonces de los diversos armónicos de la frecuencia de modulación en la señal del detector. Se conocen circuitos de detección de bucle abiertos y cerrados. En [1, 2], el modulador de fase es un modulador de birrefringencia, que modula directamente la fase diferencial de las ondas ortogonales. Se conoce un esquema modificado a partir de las Refs. [4, 5]. En la presente, las dos ondas de luz polarizadas linealmente se propagan inicialmente en dos ramas de fibras separadas antes de que se combinen con ondas ortogonales en un acoplador de fibra que mantiene la polarización. Un modulador en una o en ambas ramas de la fibra modula la fase de las ondas individualmente polarizadas linealmente.

25 El documento WO 2011/069 558 A1 [6] describe un método sobre cómo calibrar individualmente el módulo optoelectrónico y el cabezal de dichos sensores para permitir el intercambio de cualquiera de los componentes en el campo sin la necesidad de una recalibración posterior del sensor. WO 2011/069 558 A1 también describe para este propósito un conector de fibra PM a lo largo de la fibra que transporta los modos de polarización ortogonales.

30 El módulo optoelectrónico de los sensores de corriente de fibra óptica del tipo anterior está conectado al cabezal del sensor (que en las subestaciones de AV normalmente tiene un potencial de alto voltaje) mediante un cable de fibra que mantiene la polarización (PM). Para facilitar la instalación del sensor o la sustitución del módulo optoelectrónico, p. ej. al final de su vida útil, es deseable tener conectores de fibra en uno o ambos extremos del cable de la fibra. Sin embargo, los conectores no deben reducir la precisión del sensor. Particularmente, para la aplicación de la medición de electricidad, se debe mantener una precisión dentro de $\leq \pm 0,2\%$ en intervalos de temperatura extendidos. La industria de electrodeposición incluso requiere $\leq \pm 0,1\%$ para algunas mediciones. Para mantener una precisión tan alta, la polarización de diafonía entre las dos ondas de luz ortogonales en el conector debe estar por debajo de -33 dB, preferiblemente incluso por debajo de -36 dB. En comparación, los conectores PM disponibles en el mercado generalmente se especifican con una diafonía entre -20 dB y -25 dB. Dichos conectores no son adecuados para su uso en FOCS con precisión de medición. Típicamente, la diafonía cambia con la temperatura como resultado de la tensión mecánica variable de la fibra en las virolas del conector. Un cambio en el acoplamiento cruzado de polarización, por ejemplo de -25 dB a -23 dB, ya daría como resultado un cambio de factor de escala de aproximadamente 0,4%. (A modo de comparación, un cambio de -35 dB a -33 dB altera el factor de escala solo en aproximadamente 0,04%).

45 El acoplamiento cruzado en el conector de fibra entre los modos de polarización ortogonal de la fibra genera ondas de luz secundarias. En la bobina de fibra de detección, las ondas secundarias y sus ondas principales experimentan un cambio de fase magneto óptica de señal opuesta. En la técnica anterior, las ondas secundarias interfieren con sus ondas principales y debido a su cambio de fase opuesto pueden influir significativamente en la señal del sensor.

El documento US 2012/0121216 A1 [7] describe otro ejemplo de un sensor de corriente de fibra óptica.

Descripción de la invención

55 Por lo tanto, el problema que la presente invención debe resolver es proporcionar un sensor de corriente de fibra óptica como se describió anteriormente que tenga un conector para conectar la fibra de conexión que mantiene la polarización al módulo optoelectrónico, pero que es confiable, incluso si el conector se abre y cierra repetidamente o si está sujeto a otros eventos que pueden cambiar su comportamiento de acoplamiento cruzado.

El sensor de corriente de fibra óptica de la reivindicación 1 resuelve este problema.

En consecuencia, el sensor de corriente de fibra óptica comprende:

- Una fuente de luz que genera luz con una longitud de coherencia L_c ,
- Un primer divisor de haz que divide la luz de la fuente de luz en una primera y una segunda rama,
- Un segundo divisor de haz que combina la luz de dichas primera y segunda rama,
- 5 - Una fibra de conexión que mantiene la polarización adaptada para transportar luz en el primer y segundo modo de polarización mutuamente ortogonal y recibe luz de dicho segundo divisor de haz para un primer pasaje a través de dicha fibra de conexión,
- Un cabezal de sensor adaptado y estructurado para recibir ondas de luz de dichos primer y segundo modo de polarización de dicha fibra de conexión, para generar un cambio de fase dependiente de la corriente entre dichas ondas de luz, y para reflejar dichas ondas de luz nuevamente dentro de dicha fibra de conexión con polarizaciones conmutadas para un segundo pasaje a través de dicha fibra de conexión. En este contexto, la expresión "polarizaciones conmutadas" establece que la onda que se recibió del primer modo de polarización de la fibra de conexión se refleja desde el cabezal del sensor al segundo modo de polarización de la fibra de conexión, y la onda que se recibió del segundo modo de polarización de la fibra de conexión se refleja desde el cabezal del sensor al primer modo de polarización de la fibra de conexión;
- 10 - Un detector ubicado para detectar la intensidad de la luz resultante de una interferencia de dichas ondas después de que pasan por segunda vez a través de dicha fibra de conexión. Dado que el cambio de fase de las ondas de luz y, por lo tanto, la intensidad de la luz resultante depende de la corriente, el detector puede medir la corriente.

El sensor comprende además dos conectores:

- 20 - Un primer conector liberable está dispuesto en dicha primera rama, y
- Un segundo conector liberable está dispuesto en dicha segunda rama.

En este contexto, el "conector liberable" designa un conector que se puede liberar (abrir) y volver a conectar (cerrar) repetidamente.

25 Este diseño, p. ej. permite variar las rutas ópticas en el sistema y, por lo tanto, generar diferencias de ruta entre las diversas ramas y entre ondas de luz con y sin acoplamiento cruzado para minimizar las interferencias no deseadas. Alternativamente, o además de esto, permite encerrar cada conector en ambos lados en polarizadores, bloqueando así cualquier onda de luz de acoplamiento cruzado.

30 En realizaciones, la primera rama está ventajosamente adaptada para transportar luz en un primer y segundo modo de polarización entre dicho primer conector y un "seleccionar uno" de dicho primer y segundo divisor de haz, y la segunda rama está adaptada para transportar luz en un primer y un segundo modo de polarización entre dicho segundo conector y dicho divisor de haz seleccionado, con el término "divisor de haz seleccionado" que designa uno de los divisores de haz (véase más abajo para una explicación más detallada). Cuando los conectores están perfectamente alineados, es decir, no hay desalineación angular, la luz que viaja hacia el cabezal del sensor está en los "primeros modos de polarización" de la primera y segunda rama. El conjunto de la primera y segunda rama entre
35 los conectores y el divisor de haz es asimétrico como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\text{abs}(L_{11} + L_{21} - L_{12} - L_{22}) > L_c$$

con

L11 es la longitud de la ruta óptica del primer modo de polarización en la primera rama entre el primer conector y el divisor de haz seleccionado,

40 L12 es la longitud de la ruta óptica del segundo modo de polarización en la primera rama entre el primer conector y el divisor de haz seleccionado,

L21 es la longitud de la ruta óptica del primer modo de polarización en la segunda rama entre el segundo conector y el divisor de haz de selección, y

45 L22 es la longitud de la ruta óptica del segundo modo de polarización en la segunda rama entre el segundo conector y el divisor de haz seleccionado.

L_c , como se mencionó anteriormente, es la longitud de coherencia de la luz de la fuente de luz.

La función $\text{abs}(x)$ designa el valor absoluto de x .

En este contexto, una "longitud de la ruta óptica" de un modo de polarización debe entenderse como la totalidad del producto del índice de refracción del grupo (como se ve a la luz de este modo de polarización) y la longitud geométrica

de la ruta integrada a lo largo de la ruta. Por ejemplo, si la primera polarización de la primera rama ve un índice de refracción n_1 a lo largo de toda la ruta entre el primer conector y el primer acoplador, y esta ruta tiene una longitud geométrica l_1 , la longitud de la ruta óptica es igual al producto $n_1 \cdot l_1$.

5 La invención se basa en entender que, como se describe con más detalle a continuación, una desalineación de los conectores conduce a la inserción de luz de acoplamiento cruzado en modos de polarización no deseados en las ramas entre los conectores y el segundo divisor de haz. Esta luz de acoplamiento cruzado viaja al cabezal del sensor y de regreso, donde llega como luz entrante al detector, junto con la luz primaria entrante (es decir, la luz sin acoplamiento cruzado) que también regresa desde el cabezal del sensor. Para una disposición simétrica del conjunto de la primera y segunda rama entre los conectores y el divisor de haz seleccionado, la luz de acoplamiento cruzado
10 entrante puede tener u obtener componentes que sean coherentes con la luz primaria entrante, lo que a su vez dará lugar a señales que generan un error en los datos medidos. Sin embargo, al usar un diseño asimétrico como se describió anteriormente, la luz parásita entrante no será coherente con la luz primaria entrante y, por lo tanto, no afectará o solo afectará débilmente la medición interferométrica.

15 La presente invención modifica el circuito óptico de los FOCS de manera que se genera una diferencia de ruta entre las ondas primarias y las ondas secundarias de acoplamiento cruzado. La diferencia de ruta es mayor que la longitud de coherencia de la fuente de luz, de modo que las ondas secundarias (de acoplamiento cruzado) ya no interfieren con las ondas primarias. Como resultado, la influencia de las ondas secundarias en la señal del sensor disminuye drásticamente. Mientras que en la técnica anterior, el acoplamiento cruzado de polarización en el conector debe permanecer por debajo de -33 dB para limitar los cambios de señal al cambiar el acoplamiento cruzado a $<0,1\%$, se requiere un límite mucho menos desafiante de solo p. ej. -16,5 dB con la presente invención.
20

En una realización típica, la primera rama comprende una primera y una segunda sección de fibra birrefringente conectada bajo un ángulo mutuo de 90° entre sus ejes de fibra lenta, p. ej. a una unión de 90° . Ventajosamente, por otro lado, la segunda rama no comprende una primera y una segunda sección de fibra birrefringente conectada bajo un ángulo mutuo de 90° , sino más bien solo una única sección de fibra birrefringente. (Nota: en la presente memoria, el término "sección de fibra birrefringente única" incluye también una sección de fibra que está compuesta de dos o más secciones de fibra birrefringente que están unidas por una o más uniones de 0° , es decir, los ejes lentos de las secciones de fibra de unión son paralelos).
25

En ese caso (es decir, cuando hay dos secciones de fibra en la primera rama), estas secciones de fibra pueden encontrarse:

- 30 (a) en una ubicación entre dicho primer conector y dicho divisor de haz seleccionado;
(b) en una ubicación entre dicho primer conector y el divisor de haz que no es el divisor de haz seleccionado; o
(c) en el primer conector.

La variante (a) permite ubicar el conector cerca del detector. La variante (b) proporciona un diseño más simple para los componentes que se encuentran entre el conector y el cabezal del sensor. La variante (c) permite integrar la funcionalidad de unión de 90° en el conector.
35

En otra realización ventajosa, el sensor puede comprender al menos un modulador de fase adaptado para modular la fase de la luz en la primera y/o la segunda rama. Por lo tanto, las dos ramas pueden usarse para técnicas de detección de modulación de fase.

40 El sensor puede comprender un conjunto de cable entre (es decir, en la ruta óptica entre) los conectores y el cabezal del sensor. Este conjunto de cable comprende dicha fibra de conexión y dicho segundo divisor de haz, y termina en un primer y un segundo miembro de acoplamiento de dicho primer y dicho segundo conector, respectivamente.

Otras realizaciones ventajosas se enumeran en las reivindicaciones dependientes o combinaciones de reivindicaciones, así como en la descripción a continuación.

Breve descripción de los dibujos

45 La invención se entenderá mejor y los objetos distintos de los expuestos anteriormente se harán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada de la misma. Dicha descripción hace referencia a los dibujos anexos, en donde:

La Figura 1 muestra una configuración de sensor con modulador de birrefringencia y conector de fibra PM (técnica anterior).

La Figura 2 muestra una configuración de sensor con modulador de tipo y, y conector de fibra PM,

50 La Figura 3 muestra el acoplamiento cruzado de polarización en el conector de fibra: los ejes de fibra principales x' , y' en la 2da virola del conector giran (desalineados) en un ángulo α con respecto a los ejes x , y en la primera virola; como resultado, el par de ondas ortogonales de propagación de ida con polarizaciones a lo largo de x e y se divide en dos pares de ondas ortogonales con polarizaciones a lo largo de x' e y' ,

La Figura 4 muestra ondas de luz con polarizaciones a lo largo de x e y que regresan al módulo optoelectrónico (después del 2do pasaje a través del conector) en caso de acoplamiento cruzado de polarización en el conector para las configuraciones de sensor de las Figuras 1, 2 (técnica anterior), las fases relativas de las ondas de luz son válidas para corriente cero ($\phi_F = 0$), y si se aplica corriente, las ondas cambian de fase en cantidades $2\phi_F$ en la dirección indicada por las flechas,

La Figura 5 muestra una primera realización de una configuración de sensor con conectores de fibra PM,

La Figura 6 muestra las ondas de luz interferentes para la configuración de la Figura 5 en caso de acoplamiento cruzado de polarización en los conectores (con las ondas C bloqueadas por ignorar el modulador),

La Figura 7 muestra una señal de sensor normalizada frente a la desalineación del conector para sensores de corriente de fibra óptica de la técnica anterior (línea discontinua) y de acuerdo con la presente técnica (línea continua),

La Figura 8 muestra una sección ampliada de la Figura 7 para ángulos de desalineación pequeños en el intervalo prácticamente relevante,

La Figura 9 muestra una señal de sensor normalizada frente al acoplamiento cruzado de polarización en el conector de fibra para sensores de corriente de fibra óptica de la técnica anterior (línea discontinua) y de acuerdo con la presente técnica (línea continua), la línea punteada muestra la relación entre ángulo de desalineación y el acoplamiento cruzado de polarización,

La Figura 10 muestra una sección ampliada de la Figura 9 para ángulos de desalineación pequeños en el intervalo prácticamente relevante,

La Figura 11 muestra un acoplador PM como parte de un conjunto de cable de fibra,

La Figura 12 muestra una segunda realización de una configuración de sensor con conectores de fibra PM,

La Figura 13 muestra una tercera realización de una configuración de sensor con conectores de fibra PM,

La Figura 14 muestra una cuarta realización de una configuración de sensor con conectores de fibra PM,

La Figura 15 muestra una quinta realización de una configuración de sensor con conectores de fibra PM,

La Figura 16 muestra una sexta realización de una configuración de sensor con conectores de fibra PM.

Modos para llevar a cabo la invención

Definiciones:

Se entiende que un "modo de polarización" de una guía de ondas, en particular una fibra, designa uno o más modos de guía de ondas que tienen una polarización de luz común.

Se entiende que una guía de onda o fibra que tiene "un primer y un segundo modo de polarización", o cualquier expresión similar, designa una guía de onda que tiene un primer modo (o modos) de guía de onda y un segundo modo (o modos) de guía de onda en el que la luz tiene diferentes polarizaciones.

Un "divisor de haz" es un dispositivo que permite dividir la luz de un canal de origen en al menos dos ramas o combinar la luz de al menos dos ramas en un canal de destino común. Por ejemplo, dicho divisor de haz puede, p. ej. ser un acoplador de fibra, un divisor de haz integrado y/o un dispositivo que aproveche la reflexión parcial en las superficies.

Configuraciones de sensores de la técnica anterior con conectores de fibra que mantienen la polarización:

La Figura 1 representa un sensor de corriente de fibra óptica según la técnica anterior [1, 2, 6].

Comprende un módulo optoelectrónico 1 que tiene una fuente de luz 2. La luz de la fuente de luz 2 se envía a través de un acoplador de fibra 1×2 3 y un polarizador 4 a un modulador de fase 5 y desde allí a un conector 6. Dos ondas de luz polarizados linealmente con direcciones de polarización ortogonales se envían a través de una fibra de conexión que mantiene la polarización 7 a un cabezal de sensor 8. El polarizador 4 es típicamente un polarizador de fibra. Puede estar representado por una fibra polarizante o un elemento polarizador discreto con pigtailed de fibra. En este último caso, al menos el pigtail del lado de la bobina es una fibra que mantiene la polarización.

El cabezal de sensor 8 comprende un retardador de cuarto de onda de fibra óptica 9 (una pieza corta de fibra birrefringente de longitud apropiada) que recibe la luz de la fibra de conexión 7 y la envía a una fibra de detección 10, que se enrolla alrededor del conductor de corriente 11 en el cual se medirá la corriente. Un espejo 12 está dispuesto al final de la fibra de detección 10. Típicamente, el espejo 12 se realiza como un recubrimiento reflectante en la punta de la fibra.

Típicamente, la fuente de luz 2 es una fuente de semiconductores de banda ancha tal como un diodo superluminiscente. El retardador de cuarto de onda 9 en la entrada de la fibra de detección 10 convierte las ondas lineales en ondas de luz polarizadas circularmente izquierdas y derechas. Las ondas se reflejan en el extremo más alejado de la fibra de detección 10 por el espejo 12, luego vuelven sobre su ruta óptica de regreso al módulo optoelectrónico 1 con estados de polarización intercambiados, y finalmente interfieren entre sí en el polarizador de fibra 4.

Las dos ondas de luz acumulan un cambio de fase magneto óptico diferencial $\Delta\phi$ en la bobina de fibra como resultado del efecto Faraday. Se mide por medio de un circuito de detección de bucle cerrado operado por una unidad de procesamiento 13 que controla el modulador de fase 5, que modula la fase diferencial de los estados de polarización ortogonal. Comúnmente, se emplea un modulador de niobato de litio óptico integrado. El cambio de fase magneto óptico $\Delta\phi$ se da como $\Delta\phi = 4\phi_F$ con $\phi_F = V \cdot N \cdot l$. V es la constante Verdet de la fibra de detección de sílice fundida (1,0 $\mu\text{rad}/\text{A}$ a 1310 nm), N la cantidad de bucles de la bobina de fibra, e l la corriente. En lugar de un bucle cerrado, se puede emplear la detección de bucle abierto. En el último, a menudo se utilizan moduladores piezoeléctricos más simples [1, 2]. Los detalles se describen en [3].

En vista de las siguientes secciones, se debe tener en cuenta que con una fuente de baja coherencia, las ondas de luz ortogonales pierden su coherencia durante su propagación desde una unión de 45° 14 después del polarizador de fibra 4 hacia la fibra de detección 10 como resultado del retraso del grupo diferencial en la fibra de conexión PM 7 y el modulador 5. Dado que las ondas regresan del espejo 12 con estados de polarización intercambiados, el retraso del grupo se invierte en la ruta de retorno y la coherencia se restablece cuando las ondas vuelven al polarizador 4. En condiciones ideales, la visibilidad marginal de interferencia K definida como $K = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$ es entonces igual a la unidad. Aquí I_1 , I_2 son las intensidades de luz en interferencia constructiva y destructiva, respectivamente.

Comúnmente, la luz de la fuente de luz 2 se despolariza mediante un despolarizador Lyot de fibra óptica (no se muestra), que se coloca entre la fuente de luz 2 y el acoplador de fibra 3.

La Figura 2 muestra una configuración de sensor modificada que permite utilizar un módulo de modulación de fase de óptica integrada de rama y 5' con dos moduladores de fase integrados 5 operados con la fase opuesta como se usa a menudo en giroscopios de fibra en lugar de un modulador de birrefringencia [4, 5]. En el ejemplo dado, las guías de onda del módulo de modulación 5' se realizan por intercambio de protones. Como resultado, solo admiten la polarización en el plano del chip, es decir, el módulo de modulación 5' también actúa como polarizador. Las dos ondas de luz que se propagan hacia adelante, que emergen con polarizaciones lineales paralelas desde el modulador (polarización a lo largo de y , siendo y paralela al plano del chip) se combinan con ondas ortogonales en un divisor de haz que mantiene la polarización 15. Para este propósito, uno de los dos cables de fibra de entrada del divisor de haz 15 se une en un punto de unión 16 a la fibra desde el modulador con un desplazamiento de 90° en la orientación de los ejes birrefringentes. El cabezal de sensor 8 es el mismo que en la Figura 1. Las ondas ortogonales de retorno se dividen en el divisor 15 en las ramas de fibra superior e inferior, de modo que un par de ondas ortogonales se acoplan en cada una de las dos ramas del modulador. Las dos ondas polarizadas paralelas a la dirección de transmisión del módulo de modulación 5' (con dirección y), después de haber recorrido rutas recíprocas, son sometidas a interferencia. Las otras dos ondas con polarización a lo largo de x están bloqueadas por el modulador de polarización. Estas ondas han viajado a lo largo de rutas no recíprocas, ya que una onda se ha propagado hacia adelante y hacia atrás a través de la rama superior de la fibra, mientras que la otra onda ha viajado a través de la rama inferior. Las longitudes desiguales de las dos ramas de la fibra (bucle de retraso en la rama inferior) evitan la interferencia de estas ondas en caso de que se filtren parcialmente a través del modulador. La diferencia de la ruta óptica de las ondas que regresan con la polarización x corresponde al doble de la longitud del bucle de retraso y es mucho más larga que la longitud de coherencia L_c de la fuente de luz de banda ancha 2.

En subestaciones de alta tensión, para la transmisión de energía eléctrica, el módulo optoelectrónico 1 del sensor está en potencial de tierra (p. ej., en un cubículo exterior o en la cámara de control de la subestación) y el cabezal de sensor (bobina de fibra) 8 está en potencial de alta tensión (p. ej. encima de un aislante de soporte independiente o integrado en un interruptor automático) con una fibra de conexión que mantiene la polarización 7 entre ellos. Se sabe conectar la fibra de conexión 7 al módulo optoelectrónico 1 por medio de un conector 6, que se encuentra entre el modulador 5' y la fibra de conexión 7 (configuración del sensor de acuerdo con la Figura 1) o entre el divisor de haz 15 y la fibra de conexión 7 (configuración del sensor según la Figura 2) [6].

Preferiblemente, se instala el conector 6 en el alojamiento del módulo optoelectrónico 1. Es deseable un conector, ya que facilita la instalación y la sustitución de los módulos sensores y evita la necesidad de uniones de fibra en el campo. Por otro lado, los conectores pueden ser una fuente de diafonía adversa entre los dos modos de polarización ortogonal que se propagan en la fibra. La diafonía resulta de las tolerancias en la alineación angular de los ejes principales de las dos secciones de fibra conjuntas y de la tensión originada por pegar las fibras en las virolas del conector. La alineación del eje puede cambiar en la apertura/cierre repetido del conector debido a las tolerancias mecánicas de las diversas partes del conector y al cambio de tensión de la fibra en las virolas del conector. Típicamente, la tensión también cambia con el tiempo y la temperatura. Dado que la diafonía afecta al factor de escala del sensor, debe mantenerse por debajo de los límites críticos. Si el sensor se usa para la medición de electricidad, el conector debería afectar el factor de escala en significativamente menos del 0,1%. Para este fin, el acoplamiento cruzado de polarización debe permanecer por debajo de -33 dB. Esto corresponde a una desalineación máxima permitida entre los ejes de

fibra de solo 1,2°. Los conectores típicos PM disponibles comercialmente mantienen la polarización solo dentro de aproximadamente >-25 dB. En la técnica anterior, un cambio en la diafonía entre -25 dB y -22 dB cambia la señal del sensor en un 0,6%. (Los ángulos de desalineación correspondientes son 3,2° y 4,5°, respectivamente). En muchas aplicaciones de sensores, tales variaciones no son aceptables. Nota: como cuestión de principio, la diafonía de polarización finita de p. ej. 25 dB todavía da como resultado una señal de sensor estable siempre que la diafonía permanezca constante. El factor de escala del sensor modificado se puede tener en cuenta mediante la calibración. Sin embargo, como se señaló, dicha diafonía generalmente cambia en las operaciones de apertura/cierre del conector y con el tiempo y la temperatura, lo que puede provocar cambios de señal significativamente mayores que 0,1% o 0,2%.

5

10

Acoplamiento cruzado de polarización en el conector e influencia en la señal del sensor (técnica anterior):

La señal de sensor normalizada S en función de un desplazamiento angular α de los ejes de fibra principales entre los dos lados de un conector se puede determinar a partir de una descripción de la matriz de Jones de propagación de luz y, suponiendo que el desplazamiento de fase inducido por el efecto Faraday sea $4\phi_F \ll 1$, se da por

$$S = 1 / \cos(2\alpha) . \quad (1)$$

15

En la presente memoria, se supone que la señal del sensor en alineación perfecta es igual a la unidad. La ecuación (1) es válida para las configuraciones de sensor de las Figuras 1, 2 con ubicaciones de conector como se indica (estado de la técnica). Un desplazamiento angular da como resultado un acoplamiento cruzado de polarización y, por lo tanto, un par secundario de ondas de luz que se propagan hacia la bobina de la fibra (Figura 3).

20

En la ruta de retorno, tanto las ondas primarias como las ondas secundarias están sujetas a un acoplamiento cruzado adicional en el conector. Como resultado, hay cuatro pares de ondas de luz ortogonales que llegan al polarizador (Figura 4): un par de ondas principales ortogonales A_x, A_y , con amplitudes $\cos^2\alpha$, y sin experimentar ningún acoplamiento cruzado (aquí se supone que la amplitud de las ondas originales es una unidad); un par de ondas terciarias B_x, B_y con amplitudes $\sin^2\alpha$, que resulta del acoplamiento cruzado en ambas rutas, es decir, la ruta de ida y vuelta, y dos pares $C_{1x}, C_{1y}, C_{2x}, C_{2y}$ con amplitudes $\cos\alpha \cdot \sin\alpha$, que resultan del acoplamiento cruzado singular en la ruta de ida o la ruta de vuelta. Las amplitudes y fases de las ondas se pueden escribir como

25

$$A_x = \cos^2\alpha \cdot \exp(-2i\phi_F) \quad (2)$$

$$B_x = -\sin^2\alpha \cdot \exp(2i\phi_F)$$

$$C_{1x} = \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \exp[i(\Delta\theta + 2\phi_F)]$$

$$C_{2x} = \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \exp[i(\Delta\theta - 2\phi_F)]$$

30

$$A_y = \cos^2\alpha \cdot \exp(2i\phi_F)$$

$$B_y = -\sin^2\alpha \cdot \exp(-2i\phi_F)$$

$$C_{1y} = \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \exp[-i(\Delta\theta + 2\phi_F)]$$

$$C_{2y} = \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot \exp[-i(\Delta\theta - 2\phi_F)]$$

35

En la presente, $\Delta\theta$ denota el cambio de fase cuasiestático como resultado de un retraso de grupo diferencial no compensado ΔL_C (véase más abajo).

40

Las ondas B_x, B_y tienen un cambio de fase de 180° con respecto a las ondas A_x, A_y (debido al sentido opuesto de rotación de polarización en el retardador de fibra) y experimentan un cambio de fase magneto óptico $2\phi_F$ de dirección opuesta. El cambio de fase magnética resultante de las ondas sumadas ($A_x + B_x$), ($A_y + B_y$) es mayor que el cambio de fase $2\phi_F$ de las ondas individuales A_x, B_x, A_y, B_y y se da por $2\phi_F / \cos(2\alpha)$. La señal del sensor detectada se mejora de acuerdo con la ecuación (1) (Nota: la razón del cambio de fase opuesto de Faraday de las ondas B es el hecho de que se propagaran a través de la bobina de la fibra con polarización circular de sentido opuesto al sentido de las ondas A como resultado del acoplamiento cruzado).

45

El retraso del grupo diferencial entre la polarización x e y en el enlace de la fibra para los pares de ondas C, C_{1x}, C_{1y} y C_{2x}, C_{2y} no está totalmente compensado en la ruta de vuelta. El retraso restante con respecto a las ondas A y B es $\pm \Delta L_C$. Aquí, $\Delta L_C = \Delta L_{PM1} + \Delta L_M + \Delta L_{PM2}$ es el retraso diferencial en la ruta desde el conector de regreso a la unión de 45° (Figura 1) y está compuesto por el retraso en las secciones de fibra PM $\Delta L_{PM1}, \Delta L_{PM2}$ antes y después del modulador y el retraso ΔL_M en el modulador en sí. Como este retraso es mucho mayor que la longitud de coherencia de la fuente de luz 2, los pares de ondas C_{1x}, C_{1y} , y C_{2x}, C_{2y} son mutuamente incoherentes y, por lo tanto, no contribuyen al cambio de fase magneto óptico detectado. Las ondas C_{1x} y C_{2x} están en fase a corriente cero, mientras que se extinguen entre sí en un cambio de fase magneto óptico de π . Lo mismo es cierto para C_{1y} y C_{2y} . A una corriente distinta de cero, las ondas C producen una luz de fondo dependiente de la corriente en el detector (pero no entran en

50

la señal del sensor). Tenga en cuenta que en el caso extremo de $\alpha = 45^\circ$, todas las ondas que vuelven tienen una amplitud de $1/2$. Las ondas A y B se extinguen entre sí, y ya no se obtiene una señal significativa.

Nota: el cambio de señal del sensor puede ser mayor que el indicado por la ecuación (1), si hay un acoplamiento cruzado de polarización no solo por la desalineación del conector, sino también por la tensión de la fibra en las virolas del conector. Comúnmente, el efecto principal se debe a la desalineación.

FOCS con sensibilidad reducida al acoplamiento cruzado de polarización del conector:

Por lo tanto, se desea reducir sustancialmente la influencia en la señal del sensor de acoplamiento cruzado de polarización en el conector en comparación con la técnica anterior. Hemos encontrado teórica y experimentalmente que las demandas en la relación de extinción de polarización (PER, por sus siglas en inglés) de los conectores PM para una configuración de sensor de acuerdo con la Figura 2 pueden reducirse drásticamente, si el conector de fibra no se coloca adecuadamente en la línea de la fibra entre el divisor de haz 15 y la fibra de conexión 7 (técnica anterior), pero si en cambio, se coloca un conector en cada una de las dos ramas, p. ej. entre el módulo de modulación 5' y el divisor de haz 15.

Tal realización se muestra en la Figura 5. Nuevamente tiene un módulo optoelectrónico 1, que está típicamente ubicado en el potencial de tierra y está conectado a un cabezal de sensor 8 por una fibra de conexión 7.

El módulo optoelectrónico 1 comprende una fuente de luz 2, que puede, p. ej. ser una fuente de luz semiconductor de banda ancha, como un diodo superluminiscente, y que genera luz con una longitud de coherencia L_c . La luz de la fuente de luz 2 se envía a través de un acoplador de fibra 1x2 3 a un módulo de modulación 5'. El módulo de modulación 5' comprende un primer divisor de haz 20 que divide el haz en dos ramas 21a, 21b. El módulo de modulación 5' comprende además moduladores de dos fases 5 operados para inducir cambios de fase de señales opuestas en las ondas de luz en las dos ramas 21a, 21b.

Las dos ramas 21a, 21b se vuelven a combinar en un segundo divisor de haz 22. Se dispone una unión de 90° 16 entre el módulo de modulación 5' y el segundo divisor de haz 22 en la primera rama 21a, mientras que una línea de retraso 23 se dispone entre el módulo de modulación 5' y segundo divisor de haz 22 en la segunda rama 21b, tal como en la realización de la Figura 2. (La línea de retraso 23 también puede ubicarse en la primera rama 21a).

A diferencia de la realización de la Figura 2, ahora hay dos conectores 6a, 6b, con un primer conector 6a dispuesto en la primera rama 21a y un segundo conector 6b dispuesto en la segunda rama 21b.

Nuevamente, como en la realización de la Figura 2, las dos ondas de luz polarizadas linealmente desde el segundo divisor de haz 22 se envían a través de una fibra de conexión que mantiene la polarización 7 y al cabezal de sensor 8.

El cabezal de sensor 8 nuevamente, p. ej. comprende un retardador de cuarto de onda de fibra óptica 9 (una pieza corta de fibra birrefringente de longitud apropiada) que recibe la luz de la fibra de conexión 7 y la envía a una fibra de detección 10, que se enrolla alrededor del conductor de corriente 11 en el que se medirá la corriente. Un espejo 12 está dispuesto al final de la fibra de detección 10.

El retardador de cuarto de onda 9 en la entrada de la fibra de detección 10 convierte las ondas lineales en ondas de luz polarizadas circularmente izquierda y derecha. Las ondas se reflejan en el extremo más alejado de la fibra de detección 10 por el espejo 12, luego vuelven sobre su ruta óptica de regreso al módulo optoelectrónico 1 con estados de polarización intercambiados, y finalmente interfieren en el primer divisor de haz 20 y la señal de interferencia resultante se detecta en un detector de luz 24.

Debe observarse que, al menos entre los conectores 6a, 6b y el segundo divisor de haz 22, las dos ramas 21a, 21b pueden transportar luz en un primer y un segundo modo de polarización. En la primera rama 21a, el primer modo de polarización, p. ej. corresponde a una polarización de luz a lo largo de la dirección x y de la Figura 5 para la sección de fibra entre el conector 6a y la unión de 90° 16, y a una polarización perpendicular al plano de dibujo entre la unión de 90° 16 y el segundo divisor de haz 22. En la segunda rama, el primer modo de polarización corresponde a una polarización de luz a lo largo de la dirección y . Los segundos modos de polarización corresponden a polarizaciones de luz perpendiculares a los primeros modos de polarización.

Cuando cada conector 6a, 6b está en alineación angular perfecta, la luz que viaja hacia el cabezal del sensor está en los primeros modos de polarización de las primeras y segundas ramas 21a, 21b. Sin embargo, una desalineación angular de los conectores 6a, 6b acoplará la luz a los otros (segundos) modos de polarización.

Los principios físicos subyacentes de esta (y las siguientes) realizaciones se explican ahora con referencia a la Figura 6, que representa las ondas de luz que interfieren en el primer divisor de haz 20 después de un viaje de ida y vuelta a través del circuito óptico (no se tienen en cuenta las ondas que están bloqueadas por el módulo de modulación de polarización 5').

Se supone que ambos conectores 6a, 6b tienen un desplazamiento angular o ángulo de desalineación α . Hay dos pares de ondas de luz que interfieren:

- 5 - (i) Las dos ondas principales A_{LB} , A_{UB} , que regresan a través de la primera y segunda rama 21a, 21b (LB, UB), respectivamente, y no experimentaron ningún acoplamiento cruzado. Son equivalentes a las ondas A_x , A_y en la Figura 3 y son nuevamente de amplitud $\cos^2\alpha$.
- (ii) Las ondas B_{LB} , B_{UB} de amplitud $\sin^2\alpha$, que resultan del doble acoplamiento cruzado (acoplamiento cruzado en cada conector 6a, 6b).

10 Sin embargo, una diferencia fundamental con respecto a la situación en la Figura 3 es que el par de ondas B ha sufrido un retraso en la ruta óptica de ΔL con respecto a las ondas A y, por lo tanto, ya no puede interferir con las ondas A. El retraso se debe al hecho de que las ondas B se propagan en la ruta de ida desde uno de los conectores 6a, 6b al segundo divisor de haz 22 y en la ruta de vuelta desde el segundo divisor de haz 22 al otro conector 6b, 6a, con una dirección de polarización ortogonal a la polarización de sus ondas primarias (principales). La demora se da por la diferencia de la ruta óptica

$$\Delta L = L_{11} + L_{21} - L_{12} - L_{22}, \quad (3)$$

15 con

L11 es la longitud de la ruta óptica del primer modo de polarización en la primera rama 21a entre el primer conector 6a y el segundo divisor de haz 22,

L12 es la longitud de la ruta óptica del segundo modo de polarización en la primera rama 21a entre el primer conector 6a y el segundo divisor del haz 22,

20 L21 es la longitud de la ruta óptica del primer modo de polarización en la segunda rama 21b entre el segundo conector 6b y el segundo divisor de haz 22, y

L22 es la longitud de la ruta óptica del segundo modo de polarización en la segunda rama 21b entre el segundo conector 6b y el segundo divisor de haz 22.

25 Como se mencionó, la longitud de la ruta óptica se da por la integral del producto del índice de refracción efectivo o grupal multiplicado por la longitud geométrica integrada sobre la longitud del canal respectivo.

30 En la realización de la Figura 5, la primera rama 21a consiste, entre el primer conector 6a y el segundo divisor de haz 22, en dos secciones que tienen longitudes respectivas l_1 y l'_1 de secciones de la fibra conectadas en la unión de 90° 16, mientras que la segunda rama 21b consiste, entre el segundo conector 6b y el segundo divisor de haz 22, en una única sección de la fibra de longitud l_2 (o, p. ej., varias secciones de la fibra conectadas por uniones de 0°). Suponiendo que todas estas secciones de la fibra están hechas del mismo tipo de fibra birrefringente con índices de refracción n' y n'' en sus dos modos de polarización, tenemos

$$L_{11} = l_1 \cdot n' + l'_1 \cdot n''$$

$$L_{12} = l_1 \cdot n'' + l'_1 \cdot n'$$

$$L_{21} = l_2 \cdot n'$$

$$35 \quad L_{22} = l_2 \cdot n''$$

y por lo tanto

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_{11} + L_{21} - L_{12} - L_{22} \\ &= (l_1 - l'_1 + l_2) \cdot \Delta n \end{aligned} \quad (3')$$

con $\Delta n = n' - n''$ siendo la birrefringencia grupal de la fibra utilizada en la primera y segunda ramificación.

40 Si, como se describe más adelante en las referencias a las Figuras 13 y 14, la unión de 90° 16 no se dispone entre el primer conector 6a y el segundo divisor de haz 22, sino más bien entre el primer conector 6a y el primer divisor de haz 20, ΔL es

$$45 \quad \Delta L = (-l_1 + l_2) \cdot \Delta n. \quad (3'')$$

El cambio de fase diferencial magneto óptico de las ondas B es nuevamente opuesto en señal al de las ondas A. Las ondas de luz que resultaron del acoplamiento cruzado en un solo conector (correspondiente a las ondas C en la Figura 4, pero que no se muestran en la Figura 6) regresan al modulador de polarización con polarización a lo largo de x, por lo tanto, están bloqueadas y no alcanzan el detector 24.

En cuanto a las ondas B, solo interfieren con las ondas A, si son coherentes con las ondas A. En otras palabras, la introducción de un retraso $\Delta L > L_c$ (siendo L_c la longitud de coherencia de la luz que se usa) entre las ondas A y B elimina la coherencia entre las ondas A y B. Como resultado, el efecto de las ondas B en la señal del sensor se reduce en gran medida. En las realizaciones de las Figuras 1 y 2 (técnica anterior), la intensidad de interferencia en el detector está determinada por el cuadrado de la suma de todos los campos de luz A y B (teniendo en cuenta sus amplitudes y fases), es decir, por $I \sim (A_x + B_x + A_y + B_y)^2$. En contraste, la intensidad de interferencia en la tecnología actual está determinada por el cuadrado de la suma de los campos A más el cuadrado de la suma de los campos B: $I \sim (A_{LB} + A_{UB})^2 + (B_{LB} + B_{UB})^2$. Como consecuencia, la influencia de las ondas B en la señal del sensor se reduce drásticamente. El cambio de fase opuesto de Faraday de las ondas B ahora da como resultado una reducción de la señal del sensor. La señal en función de α entonces se da por

$$S = \cos(2\alpha) / [(1/4) \cos(4\alpha) + 3/4] \quad (4)$$

Tenga en cuenta que la señal desaparece a $\alpha = 45^\circ$. Las curvas discontinuas y sólidas en las Figuras 7, 8 muestran la variación de la señal del sensor como una función del ángulo de desalineación α para las configuraciones de sensor de las Figuras 1, 2 (técnica anterior, ecuación (1)) y la Figura 5 (presente invención, ecuación (4)), respectivamente. En las Figuras 9, 10 el cambio de señal se representa como una función del acoplamiento cruzado de polarización del conector. El acoplamiento cruzado de polarización es el negativo de la relación de extinción de polarización (PER). La PER está relacionada con α por (curva punteada en las Figuras 9, 10):

$$\text{PER (dB)} = -10 \log(\tan^2 \alpha) \quad (5)$$

Es evidente a partir de las Figuras 7-10 que en la técnica anterior (curvas discontinuas) un acoplamiento cruzado de -30 dB (correspondiente a una desalineación relativa entre los dos lados del conector en $1,8^\circ$, que puede ocurrir fácilmente con los conectores PM de última generación) provoca un cambio de señal del 0,2% (con respecto a un conector perfecto), es decir, el sensor está entonces en el límite para la medición con precisión de clase 0,2. En contraste, con la tecnología actual (curvas sólidas) un cambio de señal del 0,2% ocurriría solo con una desalineación de $10,04^\circ$, correspondiente al acoplamiento cruzado de polarización de -15 dB. La tecnología actual reduce, de ese modo, drásticamente las demandas de los conectores PM. Incluso la desalineación dentro de ± 5 grados cambia la señal del sensor en no más de aproximadamente $\pm 0,01\%$.

En aplicaciones prácticas de sensores, los conectores se montan preferiblemente en una pared de un alojamiento de la optoelectrónica 1.

Cada conector 6a, 6b comprende un primer y un segundo miembro conector, que se acoplan al cerrar el conector. En una realización ventajosa, como se muestra en la Figura 11, los primeros miembros conectores 6a-1, 6b-1 son parte de un conjunto de cable 25 dispuesto entre los conectores 6a, 6b y el cabezal de sensor 8. El conjunto de cable 25 comprende un cuerpo de cable flexible 26 que rodea la fibra de conexión 7 y una sección terminal 27 que contiene el segundo divisor de haz 22, así como una unión 28 que conecta el segundo divisor de haz 22 a la fibra de conexión 7. Dos abanicos de salida 29, con los miembros de conector 6a-1, 6b-1 en sus extremos, terminan el conjunto de cable 25.

Para fines de redundancia, el conjunto de cable 25 puede contener dos fibras de conexión y, por lo tanto, dos segundos divisores haz con cuatro miembros de conector para cuatro conectores.

La sección terminal 27 puede ser flexible o rígida.

El segundo divisor de haz 22 p. ej. puede ser un acoplador de fibra fundida o un acoplador hecho con fibra de pulido lateral. Una versión de acoplador preferida es un acoplador PM fundido hecho de fibra de núcleo elíptico que tiene un coeficiente de temperatura pequeño de la birrefringencia de la fibra. Alternativamente, se puede usar un divisor de guía de onda óptica integrado o un divisor de haz polarizador a granel pigtail de fibra.

En lugar de usar dos pares de conectores separados en las dos ramas del circuito óptico, es concebible usar un par de conectores común con cada virola de conector con orificios para dos fibras.

Las Figuras 12-14 ilustran algunas de las posibles modificaciones de la configuración del sensor de la Figura 5.

En la realización de la Figura 12, el módulo de modulación de ramificación y de polarización se reemplaza por una combinación de un acoplador de fibra PM (que forma el primer divisor de haz 20), seguido de dos polarizadores de fibra 30 y un modulador de fase óptico integrado 5 (preferiblemente un modulador de niobato de litio) que está adaptado para introducir una modulación de fase diferencial entre las ondas de luz interferentes. En lugar de un modulador de niobato de litio se puede usar un modulador piezoeléctrico en una (o ambas) ramas de la fibra [4].

Cabe señalar que, en comparación con la configuración del sensor de la Figura 1, la configuración de la Figura 12 no solo es más tolerante al acoplamiento cruzado de polarización en los conectores de fibra, sino que es igualmente tolerante al acoplamiento cruzado en el modulador 5. Esto significa que las demandas en la relación de extinción de polarización del modulador 5 se relajan de la misma manera que se relajan para los conectores.

Las posiciones del módulo de modulación de tipo y 5' y el segundo divisor de haz 22 en la Figura 5 pueden intercambiarse. En este caso, sin embargo, el módulo de modulación debe admitir ambos modos de polarización ortogonales. En este caso, el retraso grupal requerido por la ecuación (3) será introducido en gran medida por el modulador, es decir, las secciones de fibra desde el módulo de modulación hasta los conectores pueden tener la misma longitud o similar. Esto es particularmente conveniente si se usa un par de conectores comunes (virolas con dos perforaciones de fibra) para las dos ramas.

En lugar de usar dos polarizadores después del primer divisor de haz 20, se puede usar un solo polarizador antes del primer divisor de haz 20.

Como se mencionó y se ilustra en la Figura 13, la unión de 90° 16 puede estar dispuesta entre el primer divisor de haz 20 y el primer conector 6a.

Además, en una solución menos ventajosa, el modulador 5 puede colocarse después del segundo divisor de haz 22, como se muestra en la Figura 14, donde actúa, como en la Figura 1, como un modulador de birrefringencia. (Aquí, el modulador se convierte, junto con el divisor de haz, en parte del conjunto de cable 25).

La Figura 14 también ilustra que se puede prescindir de la unión de 90° 16, si el primer conector 6a asume su función, es decir, si el primer conector 6a intercambia las polarizaciones en 90° entre las fibras que conecta.

En principio, el fotodetector 24 en las Figuras 12-14 también se puede conectar al extremo de fibra libre del acoplador PM del lado de la fuente (primer divisor de haz 20), lo que conserva el acoplador inicial 1x2 3. Sin embargo, esta no es una disposición preferida, debido a que las rutas ópticas de las ondas de luz que interfieren a través del acoplador se vuelven no recíprocas, lo que puede dar lugar a la inestabilidad de la señal detectada.

La Figura 15 muestra una configuración de sensor con polarizadores 30, 30' antes y después de los conectores 6a, 6b, es decir, difiere de la realización de la Figura 13 en que hay un segundo conjunto de polarizadores 30' entre los conectores 6a, 6b y el segundo divisor de haz 22, con un segundo polarizador 30' en cada una de las ramas 21a, 21b. (Nuevamente, los polarizadores 30, 30' pueden estar hechos de fibra polarizadora o elementos polarizadores discretos con pigtailes de fibra que mantienen la polarización en ambos lados.) Los polarizadores 30, 30' antes y después de los conectores 6a, 6b suprimen cualquier onda de luz que esté cruzada en los conectores durante la propagación de ida y vuelta, es decir, solo las ondas A contribuyen a la señal. Por lo tanto, el cambio de fase magnetoóptico medido se vuelve independiente de α . (Sin embargo, la relación señal/ruido disminuirá al aumentar α). En este caso, no es necesario observar los requisitos anteriores sobre la ubicación del conector (ecuación 3', 3'') al suponer polarizadores perfectos. (En caso de polarizadores imperfectos, el posicionamiento del conector de acuerdo con la ecuación 3', 3'' sigue siendo de ventaja). Alternativamente, en lugar de los dos polarizadores entre el primer acoplador 20 y los conectores 6a, 6b, solo se puede usar un único polarizador en el lado de la fuente del primer acoplador 20, es decir, en la trayectoria de la luz entre el acoplador 3 y el acoplador 20.

La Figura 16 muestra una configuración de sensor adicional pero menos ventajosa con polarizadores 30' entre los conectores 6a, 6b y el segundo acoplador 22, es decir, sin ningún polarizador 30 entre el primer acoplador 20 y los conectores 6a, 6b. Aquí, las ecuaciones 3', 3'' deben observarse nuevamente, pero ahora se aplican a las secciones de fibra entre el primer acoplador 20 y los conectores 6a, 6b, como se indica por las longitudes l_1 , l_1' y l_2 en la Figura 16. Además, el retraso del grupo diferencial entre los modos ortogonales en cada una de las dos secciones de fibra entre el primer acoplador 20 y los conectores 6a, 6b debe ser mayor que la longitud de coherencia L_c .

Por lo tanto, en otras palabras, en la realización de p. ej. la Figura 13, las ramas 21a, 21b están adaptadas para transportar luz en un primer y un segundo modo de polarización entre los conectores 6a, 6b y el segundo divisor de haz 22. Por otro lado, en la realización de la Figura 16, las ramas 21a, 21b están adaptadas para transportar luz en un primer y un segundo modo de polarización entre el conector 6a, 6b y el primer divisor de haz 20. Por lo tanto, en términos más generales que abarcan ambas realizaciones, las ramas 21a, 21b están adaptadas para transportar luz en un primer y un segundo modo de polarización entre el conector 6a, 6b y "seleccionar" uno de dichos divisores de haz primero y segundo 20, 22. En la realización de la Figura 13 (así como en las realizaciones de las Figuras 5, 12, 14), el divisor de haz seleccionado es el segundo divisor de haz 22. En la realización de la Figura 16, el divisor de haz seleccionado es el primer divisor de haz 20.

En realizaciones generales de esta invención, y aplicables a todas las otras realizaciones descritas en la presente memoria, se prefiere que el primer conector liberable 6a en la primera rama 21a y el segundo conector liberable 6b en la segunda rama 21b estén dispuestos en posiciones tales que el cabezal de sensor 8 sea desmontable o pueda separarse físicamente de la fuente de luz 2 y/o del detector 24, preferiblemente de la fuente de luz 2 y el detector 24, desconectando el primer conector liberable 6a y el segundo conector liberable 6b.

En incluso otras realizaciones generales de esta invención, y aplicables a todas las otras realizaciones descritas en la presente memoria, se prefiere además que el primer conector liberable 6a en la primera rama 21a y el segundo conector liberable 6b en la segunda rama 21b estén dispuestos en posiciones tales, que un primer grupo de componentes que comprende el cabezal de sensor 8 y el segundo divisor de haz 22 sean desmontables o puedan separarse físicamente de un segundo grupo de componentes que comprende la fuente de luz 2, el detector 24 y el primer divisor de haz 20 desconectando el primer conector liberable 6a y el segundo conector liberable 6b.

Notas:

5 En las configuraciones de sensor anteriores, el acoplamiento cruzado de polarización no solo ocurre en los conectores 6a, 6b y en el modulador 5, sino en cierta medida también en las uniones entre las diversas secciones de fibra PM. Tales secciones de fibra son, por ejemplo, los pigtails del modulador 5 o el módulo de modulación 5' y los conectores 6a, 6b. Para evitar la perturbación de la señal del sensor por ondas de luz secundarias que resultan del acoplamiento cruzado en las uniones, las longitudes de las secciones de fibra individuales deben elegirse dentro de intervalos de tal manera que los pares de ondas secundarias acumulen retrasos de grupo de ida y vuelta que son más largos que la longitud de coherencia L_c de la fuente de luz. En las configuraciones de sensor de la presente técnica, las longitudes de las secciones de fibra PM en las dos ramas 21a, 21b (que incluyen los pigtails del modulador y el conector) se pueden elegir libremente, aparte de la restricción dada por la ecuación (3). Esto proporciona más flexibilidad en el conjunto del sensor y facilita un posible intercambio del módulo optoelectrónico.

10 Como se mencionó, el modulador 5 puede ser un modulador electroóptico, en particular utilizando el efecto Pockels, o puede comprender un piezoactivador que actúa sobre una guía de onda para modular el índice de refracción de dicha guía de onda.

15 **Referencias**

1. DE 4224190 B4, priority 22.7.1992. Applicant: ABB Research Ltd. Inventor: Guido Frosio.
2. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, and H. Brändle, "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor", Journal of Lightwave Technology 20(2), 267, 2002.
3. H. Lefevre, "The fiber-optic gyroscope", Boston, MA: Artech House 1993.
- 20 4. EP 1 154 278 A2, priority 5.5.2000, Applicant: ABB Research Ltd. Inventor: Klaus Bohnert.
5. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H. Brändle, and M.G. Brunzel, "Fiber-optic current sensor for electro-winning of metals", Journal of Lightwave Technology 25(11), 3602, 2007.
6. WO 2011/069558 A1, priority 11.12.2009. Applicant: ABB Research Ltd. Inventors: K. Bohnert, A. Frank, R. Wüest.
- 25 7. US 2012/0121216 A1, publication date 17.05.2012. Applicant: Oh Min-Cheol, Jeongkwan Co. Ltd., Pusan Nat. Univ. Ind. Coop. Found. Inventor: M. Oh.

Números de referencia:

- | | |
|----------------|---|
| 1: | Módulo optoelectrónico |
| 2: | fuentes de luz |
| 3: | acoplador de fibra |
| 30 4, 30, 30': | polarizador, típicamente polarizador de fibra |
| 5, 5': | modulador |
| 6, 6a, 6b: | conectores |
| 7: | fibra de conexión |
| 8: | cabezal de sensor |
| 35 9: | retardador de cuarto de onda |
| 10: | fibra de detección |
| 11: | conductor de corriente |
| 12: | espejo |
| 13: | unidad de procesamiento |
| 40 14: | unión de 45° |
| 15: | divisor de haz |
| 16: | unión de 90° |
| 20: | primer divisor de haz |

- 21a, 21b: ramas
 - 22: segundo divisor de haz
 - 23: línea de retraso
 - 24: detector de luz
 - 5 25: conjunto de cable
 - 26: vaina
 - 27: sección terminal
 - 28: unión
 - 29: abanicos de salida
- 10

REIVINDICACIONES

1. Un sensor de corriente de fibra óptica que comprende
una fuente de luz (2) que genera luz con una longitud de coherencia L_c ,
5 un primer divisor de haz (20) que divide la luz de dicha fuente de luz (2) en una primera y una segunda rama (21a, 21b),
un segundo divisor de haz (22) que combina la luz de dicha primera y segunda rama (21a, 21b),
una fibra de conexión que mantiene la polarización (7) adaptada para transportar luz en el primer y segundo modos de polarización mutuamente ortogonales y recibir luz de dicho segundo divisor de haz (22) para un primer pasaje a través de dicha fibra de conexión (7),
10 un cabezal de sensor (8), en donde dicho cabezal de sensor (8) está adaptado y estructurado para recibir ondas de luz de dicho primer y segundo modo de polarización de dicha fibra de conexión (7), para generar un cambio de fase dependiente de la corriente entre dichas ondas de luz, y para reflejar dichas ondas de luz nuevamente dentro de dicha fibra de conexión (7) con polarizaciones intercambiadas para un segundo pasaje a través de dicha fibra de conexión (7),
15 un detector (24) ubicado para detectar una intensidad de luz resultante de la interferencia de dichas ondas después de su segundo pasaje a través de dicha fibra de conexión (7), caracterizado por que el sensor de corriente de fibra óptica comprende además:
un primer conector liberable (6a) en dicha primera rama (21a), y
un segundo conector liberable (6b) en dicha segunda rama (21b),
20 en donde dicha primera rama (21a) está adaptada para transportar luz en un primer y un segundo modo de polarización entre dicho primer conector (6a) y un seleccionado de dichos primer o segundo divisores de haz (20, 22), y
en donde dicha segunda rama (21b) está adaptada para transportar luz en un primer y un segundo modo de polarización entre dicho segundo conector y dicho divisor de haz seleccionado,
25 en donde sin la desalineación angular de dichos conectores (6a, 6b), la luz que viaja hacia el cabezal de sensor (8) está en los primeros modos de polarización de la primera y segunda rama (21a, 21b),
y en donde
- $$\text{abs}(L_{11} + L_{21} - L_{12} - L_{22}) > L_c$$
- con
- 30 L_{11} siendo una longitud de ruta óptica del primer modo de polarización en la primera rama (21a) entre el primer conector (6a) y el divisor de haz seleccionado,
 L_{12} siendo una longitud de ruta óptica del segundo modo de polarización en la primera rama (21a) entre el primer conector (6a) y el divisor de haz seleccionado,
35 L_{21} siendo una longitud de ruta óptica del primer modo de polarización en la segunda rama (21b) entre el segundo conector (6b) y el divisor de haz de selección, y
 L_{22} siendo una longitud de ruta óptica del segundo modo de polarización en la segunda rama (21b) entre el segundo conector (6b) y el divisor de haz de selección.
2. El sensor de la reivindicación 1, en donde dicha primera rama (21a) comprende una primera y una segunda sección de fibra birrefringente (I_1, I'_1) conectadas bajo un ángulo mutuo de 90° entre sus ejes principales rápidos y lentos.
40 3. El sensor de la reivindicación 2, en donde dicha primera y dicha segunda sección de fibra birrefringente (I_1, I'_1) se encuentran en una ubicación (16) entre dicho primer conector (6a) y dicho divisor de haz seleccionado.
4. El sensor de la reivindicación 2, en donde dicha primera y dicha segunda sección de fibra birrefringente (I_1, I'_1) se encuentran en una ubicación (16) entre dicho primer conector (6a) y el divisor de haz que no es el divisor de haz seleccionado.
45 5. El sensor de la reivindicación 2, en donde dicha primera y dicha segunda sección de fibra birrefringente (I_1, I'_1) se encuentran en dicho primer conector (6a).

6. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende al menos un modulador de fase (5) adaptado para modular una fase de la luz en la primera y/o en la segunda rama (21a, 21b), en particular adaptado para introducir una modulación de fase diferencial entre las ondas de luz interferentes.
- 5 7. El sensor de la reivindicación 5, en donde dicho modulador de fase (5) está dispuesto entre dichos conectores (6a, 6b) y dicho primer divisor de haz (20).
8. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones 6 o 7, que comprende además un módulo de modulación (5') que integra dicho primer divisor de haz (20), dicho modulador (5) y al menos un polarizador para polarizar las ondas que se propagan desde dicho módulo de modulación 5' hacia dicho segundo divisor de haz (22).
- 10 9. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un conjunto de cable (25) dispuesto entre dichos conectores (6a, 6b) y dicho cabezal de sensor (8), en donde dicho conjunto de cable (25) comprende dicha fibra de conexión (7) y dicho segundo divisor de haz (22) y termina en un primer y un segundo miembro conector (6a-1, 6b-1) de dicho primer y dicho segundo conector (6a, 6b), respectivamente.
10. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un polarizador (30') en dicha primera y/o dicha segunda rama (21a, 21b) entre dichos conectores (6a, 6b) y dicho segundo divisor de haz (22).
- 15 11. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un polarizador (30) en dicha primera y/o en dicha segunda rama (21a, 21b) entre dichos conectores (6a, 6b) y dicho primer divisor de haz (20).
12. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un polarizador (5') entre dicho detector (24) y dicha fuente de luz (2) en un lado y dicho primer divisor de haz (20) en el otro lado.
- 20 13. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el primer conector liberable (6a) en la primera rama (21a) y el segundo conector liberable (6b) en la segunda rama (21b) están dispuestos en posiciones tales que el cabezal de sensor (8) se puede desmontar de la fuente de luz (2) y/o del detector (24) desconectando el primer conector liberable (6a) y el segundo conector liberable (6b).
- 25 14. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el primer conector liberable (6a) en la primera rama (21a) y el segundo conector liberable (6b) en la segunda rama (21b) están dispuestos en posiciones tales que un primer grupo de los componentes que comprenden el cabezal de sensor (8) y el segundo divisor de haz (22) se pueden separar de un segundo grupo de componentes que comprenden la fuente de luz (2), el detector (24) y el primer divisor de haz (20) desconectando el primer conector liberable (6a) y el segundo conector liberable (6b).

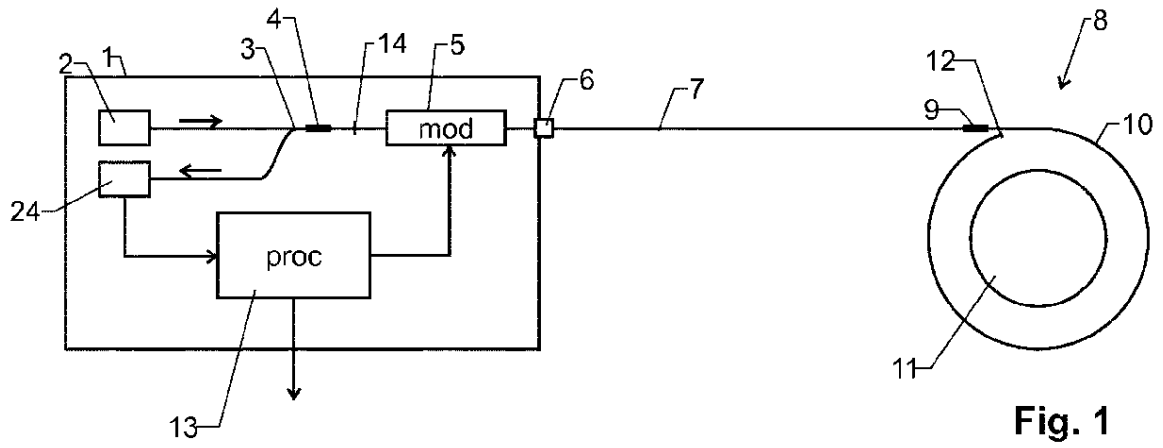


Fig. 1

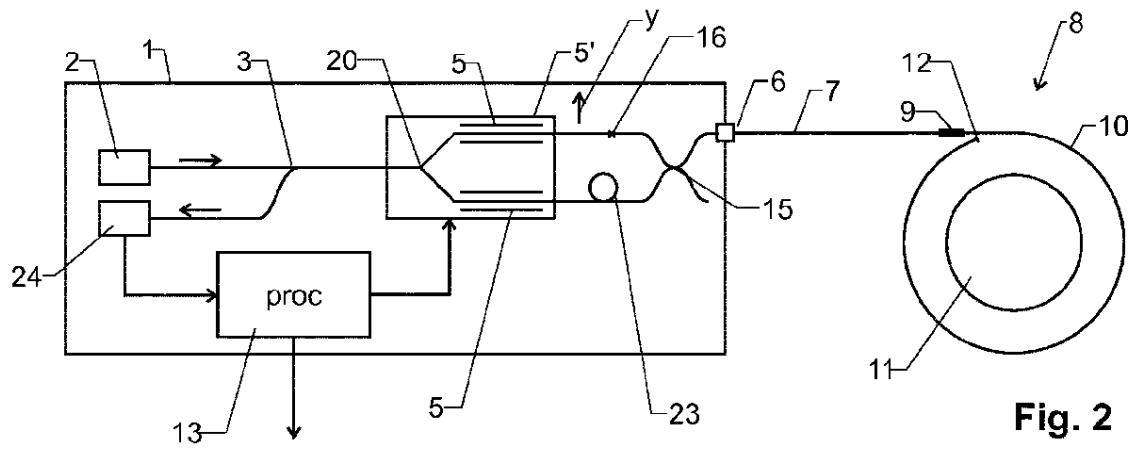


Fig. 2

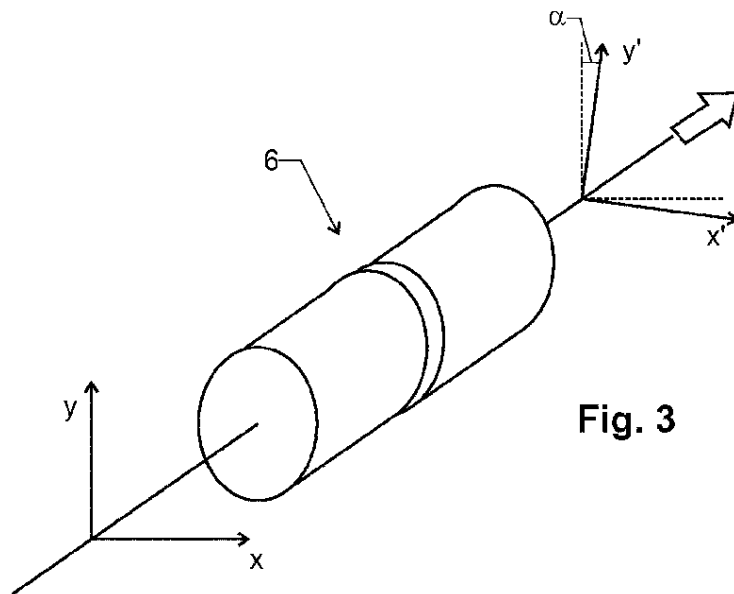
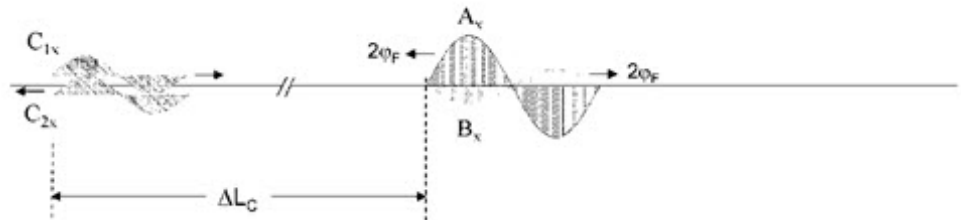


Fig. 3

Ondas que vuelven con polarización a lo largo de x



Ondas que vuelven con polarización a lo largo de y

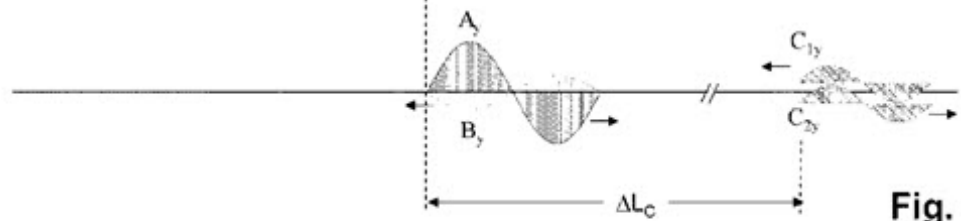


Fig. 4

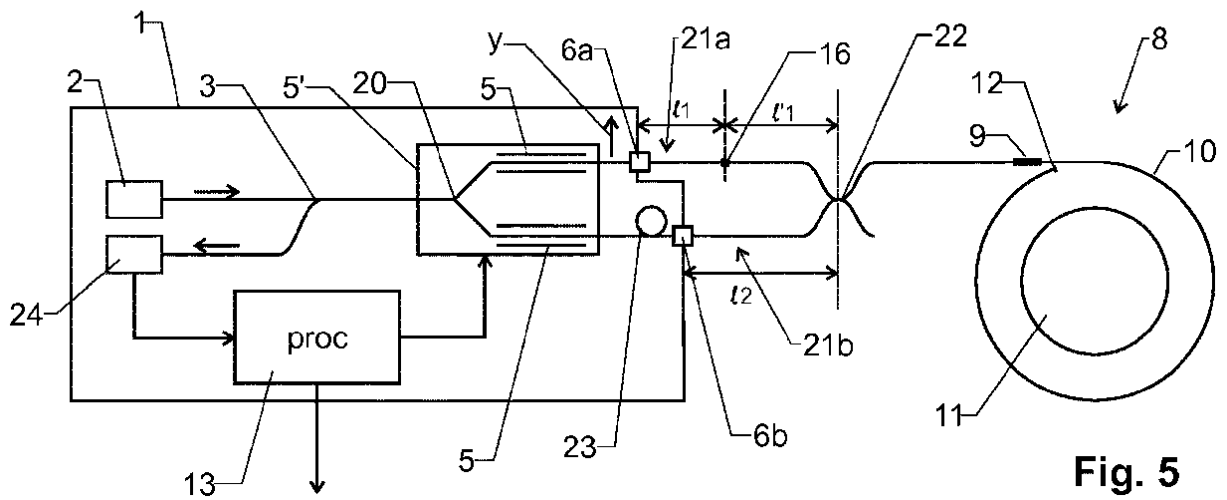
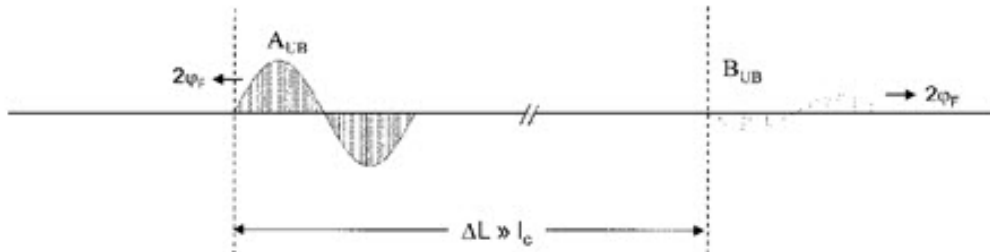


Fig. 5

Ondas de luz que regresan a través de la rama de la fibra superior



Ondas de luz que regresan a través de la rama de la fibra inferior

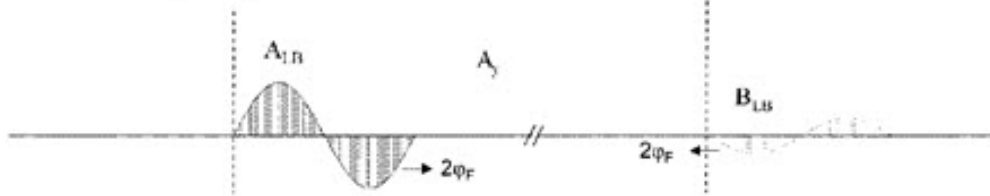


Fig. 6

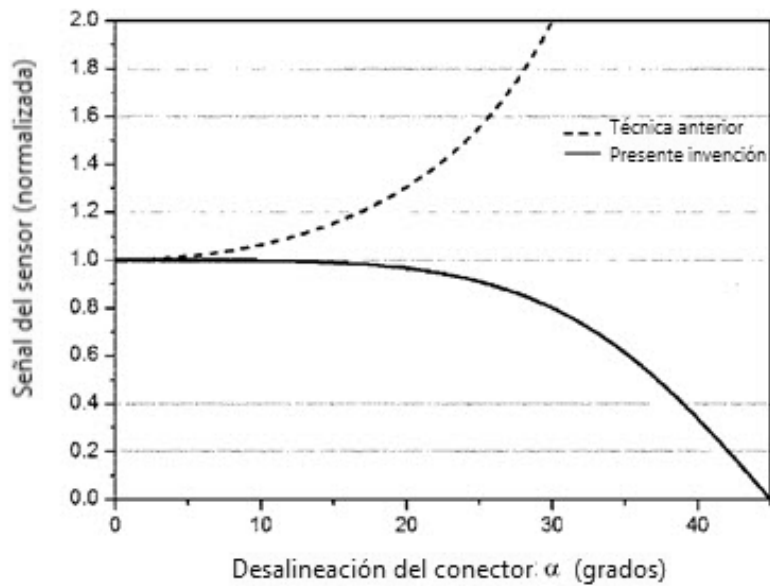


Fig. 7

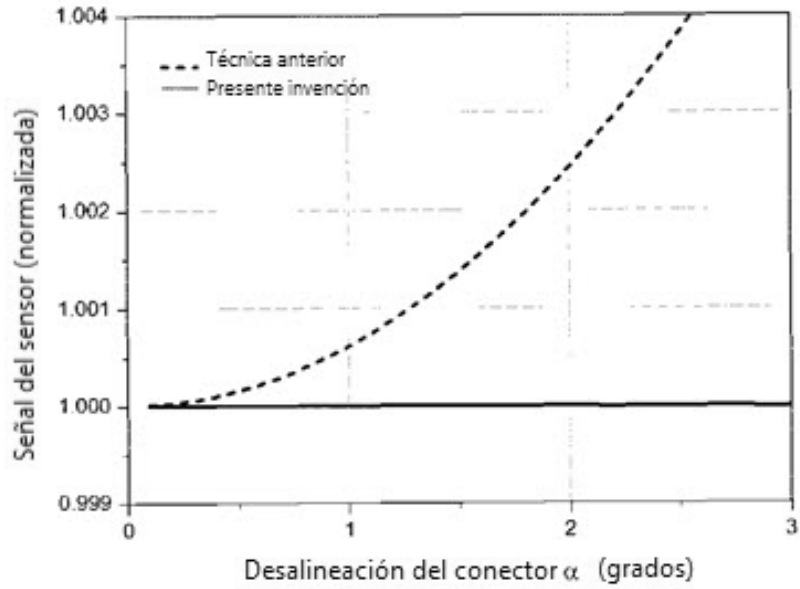


Fig. 8

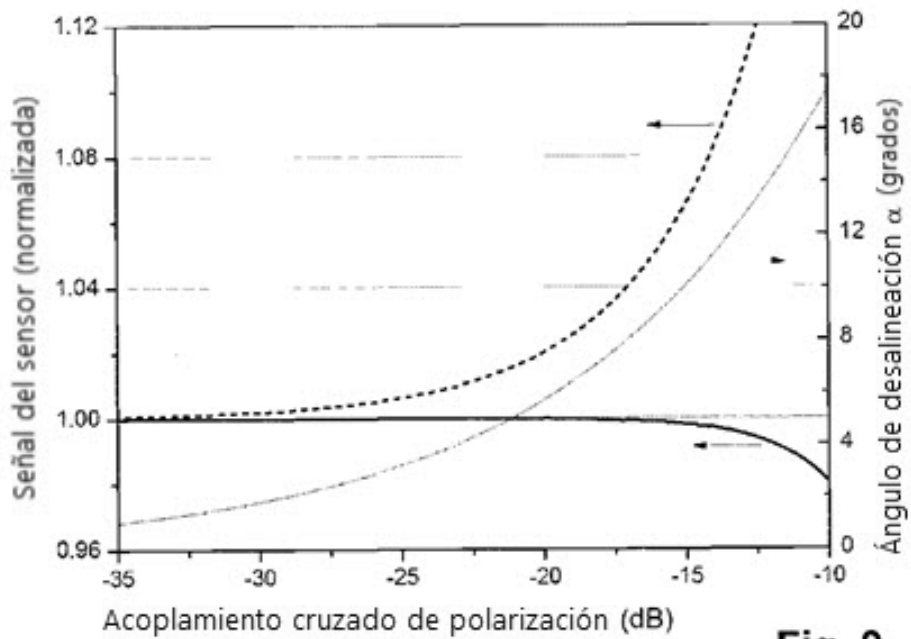


Fig. 9

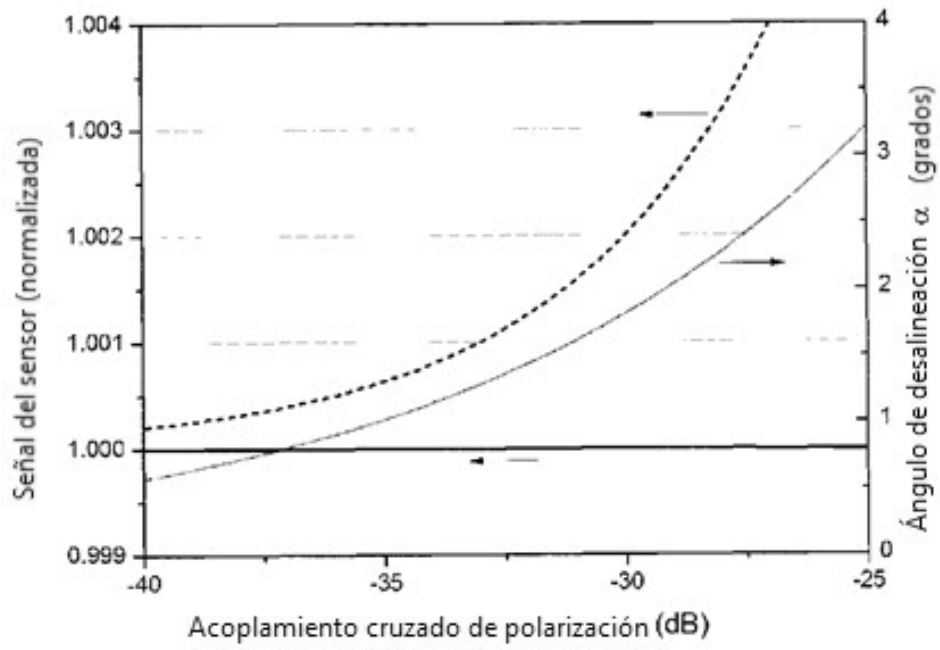


Fig. 10

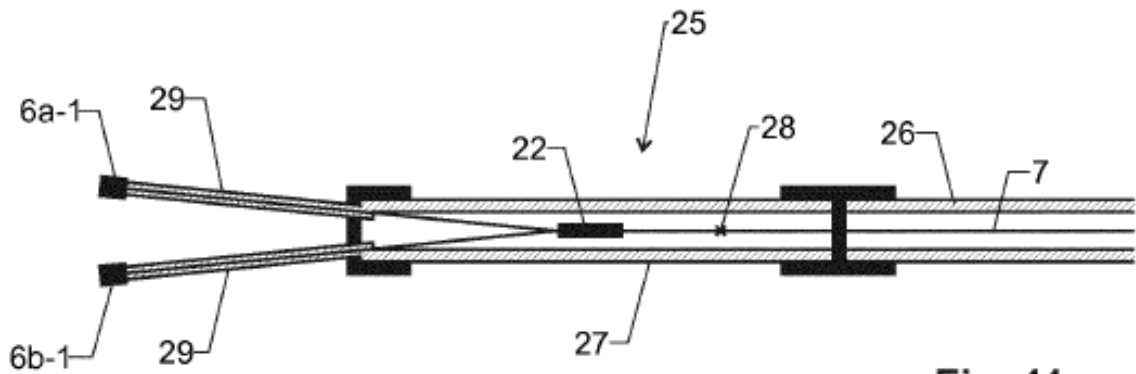


Fig. 11

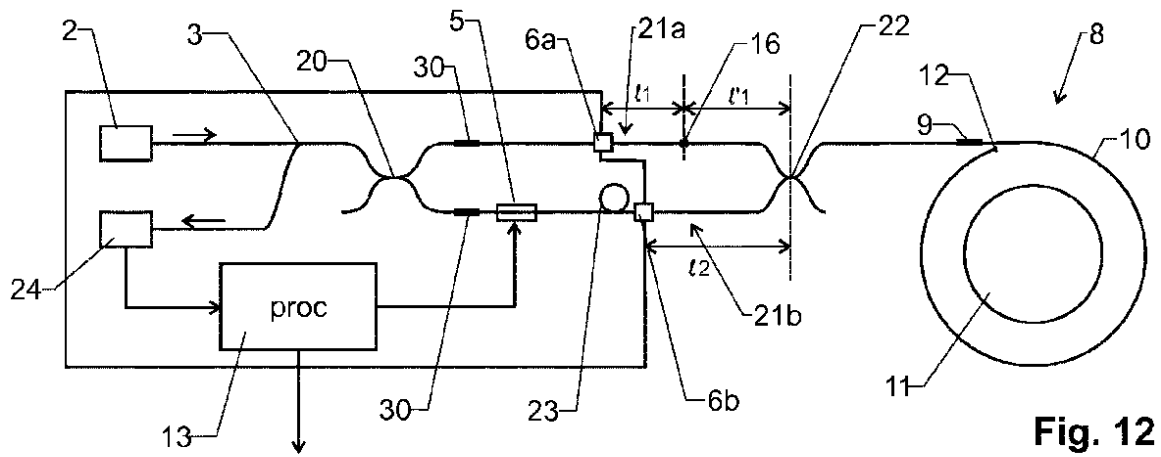


Fig. 12

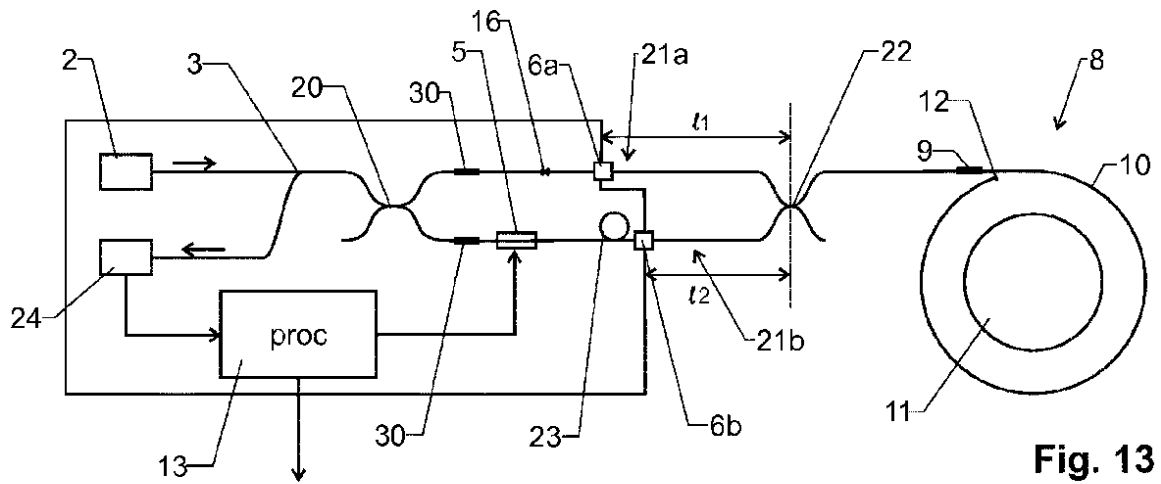


Fig. 13

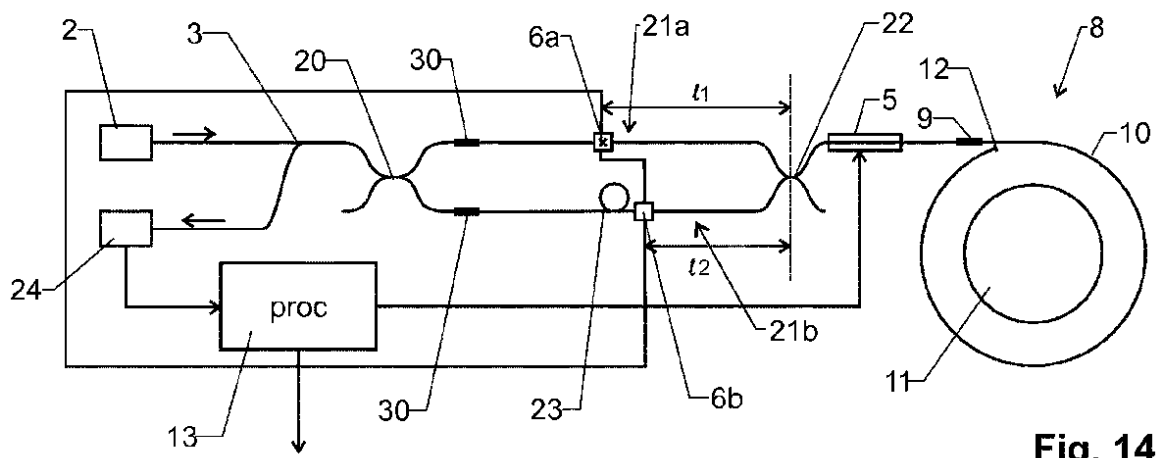


Fig. 14

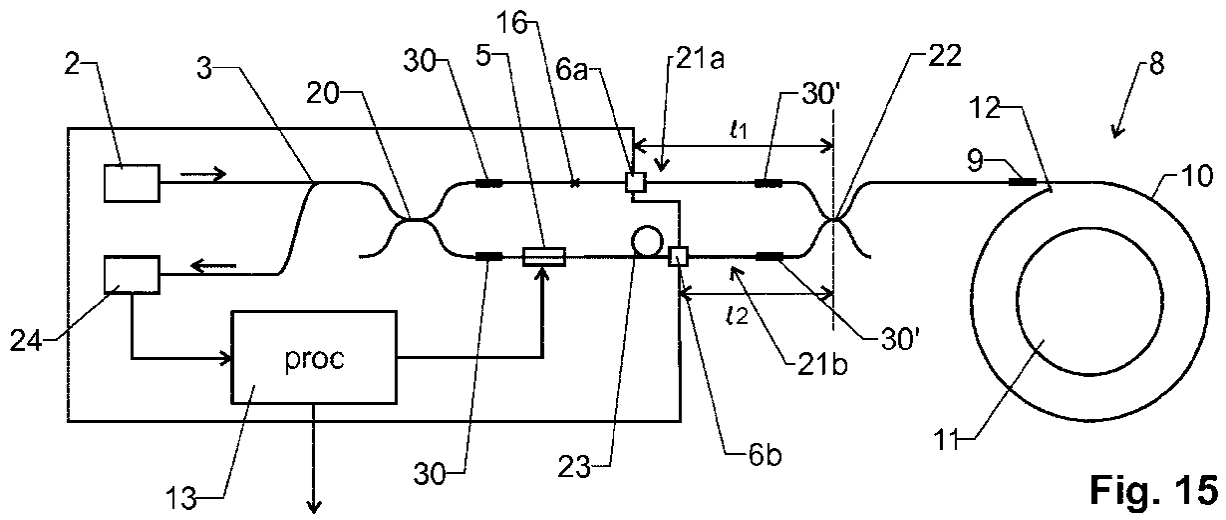


Fig. 15

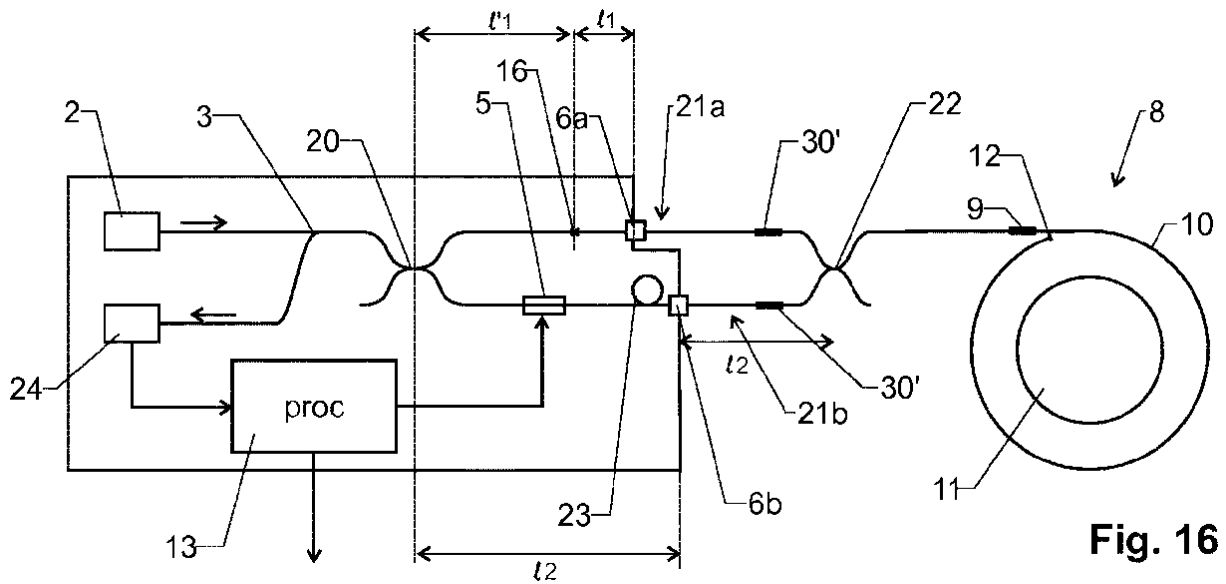


Fig. 16