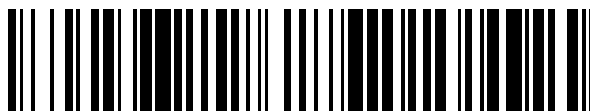


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 764 109**

51 Int. Cl.:

G01R 15/24 (2006.01)

G02B 6/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.01.2015 PCT/EP2015/050528**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.07.2016 WO16112965**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.01.2015 E 15700245 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.10.2019 EP 3245525**

54 Título: **Fibra hilada altamente birrefringente para detectar corriente con insensibilidad inherente a la temperatura**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.06.2020

73 Titular/es:
**ABB SCHWEIZ AG (100.0%)
Brown Boveri Strasse 6
5400 Baden, CH**

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

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

ES 2 764 109 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

Fibra hilada altamente birrefringente para detectar corriente con insensibilidad inherente a la temperatura

Campo técnico

5 La invención se refiere a una fibra birrefringente hilada y a un detector de corriente que comprende dicha fibra, así como al uso de dicha fibra para la medición de una corriente o de un campo magnético.

Antecedentes de la técnica

10 Los detectores de corriente de fibra óptica se basan comúnmente en el efecto Faraday magnetoóptico en una fibra de detección óptica enrollada alrededor del conductor de corriente. Se debe tener cuidado en el empaquetamiento de la fibra de detección para que la tensión mecánica no obstruya la medición de corriente con la precisión requerida a través del acoplamiento elastoóptico. Los requisitos de precisión típicos de los sistemas de transmisión de energía eléctrica son las estabilidades de señal dentro de $\pm 0,2\%$ o incluso $\pm 0,1\%$ dentro de un intervalo de temperatura, por ejemplo, comprendido desde -40°C hasta 85°C . Esencialmente, se usan dos tipos de fibra de detección para los detectores de corriente de fibra óptica:

15 (i) La fibra de detección de baja birrefringencia no muestra idealmente birrefringencia lineal intrínseca y, por tanto, es completamente sensible al efecto magnetoóptico de Faraday. Sin embargo, enrollar la fibra en una bobina de detección y endurecer el recubrimiento de fibra a bajas temperaturas introduce una tensión mecánica que puede influir significativamente en la medición en curso. Los detectores actuales que emplean fibras de detección de baja birrefringencia en alguna técnica anterior comprenden por consiguiente una fibra de detección pelada, es decir, una fibra óptica sin recubrimiento y que reside en un capilar de vidrio lleno de aceite.

20 (ii) Además, la técnica anterior usa fibra de detección altamente birrefringente hilada [1]. Dicha fibra es elípticamente birrefringente, lo que se consigue por birrefringencia lineal local con ejes principales que giran a lo largo de la fibra. Dichas fibras son típicamente producidas haciendo girar la preforma de la fibra durante el proceso de estirado. La birrefringencia lineal local puede ser conseguida mediante los mismos diseños de fibra que se utilizan para la birrefringencia lineal y, por tanto, para la fibra que mantiene la polarización [2]. Dichos diseños pueden estar basados en la birrefringencia inducida por la tensión, como los panda, corbata de pajarita [1] y estructuras de revestimiento elípticas, la birrefringencia inducida geoméricamente, tal como en las fibras microestructuradas [3], o combinaciones de tensión y birrefringencia inducida geoméricamente, tal como en fibras de núcleo elíptico [4]. La birrefringencia intrínseca giratoria de una fibra hilada altamente birrefringente consigue básicamente que la fibra sea menos sensible a la tensión mecánica exterior, mientras que la fibra aún muestra una sensibilidad importante al efecto Faraday magnetoóptico. En consecuencia, esta fibra permite un empaquetado de fibra simplificado en comparación con la fibra de detección de baja birrefringencia.

35 Sin embargo, la dependencia de la temperatura de la birrefringencia de la fibra hilada añade generalmente contribuciones adicionales dependientes de la temperatura a la señal general. En primer lugar, hay inestabilidades oscilantes de la señal dependiendo de la temperatura, como resultado de la interferencia de conjuntos de ondas de luz con diferencia de fase dependientes de la temperatura [1]. La técnica anterior usa varios remedios para eliminar este comportamiento oscilatorio. Algunos ejemplos son el uso de una fibra de detección suficientemente larga en conexión con una fuente de luz de banda ancha [1], la inyección de modos propios puros en la fibra de detección [4], el uso de una fibra de detección compuesta por dos fibras hiladas altamente birrefringentes con sentido opuesto de trenzado (spinning) [10], y el uso de una fibra hilada altamente birrefringente con birrefringencia dependiente de pequeñas temperaturas [3].

40 En segundo lugar, la birrefringencia de la fibra hilada reduce la sensibilidad general del detector de corriente en comparación con el detector correspondiente que emplea fibra de detección de baja birrefringencia [1]. Un cambio de la birrefringencia de la fibra hilada con la temperatura cambia además la sensibilidad del detector y, en consecuencia, el factor de escala del detector en muchas configuraciones de detectores de corriente de fibra óptica [1]. Este hecho da como resultado típico una variación del factor de escala principalmente lineal con la temperatura. Fibras hiladas altamente birrefringentes de la técnica anterior muestran una dependencia negativa de la temperatura (o evanescencia [3]) de su birrefringencia, es decir, su birrefringencia disminuye con la temperatura y, en consecuencia, aumenta el factor de escala de un detector de corriente que emplea esta fibra. Esta contribución dependiente de la temperatura lineal o casi lineal es del mismo signo y, por lo general, también del mismo orden de magnitud que la variación de la temperatura del efecto Faraday, que asciende a alrededor del $0,7\%/100^{\circ}\text{C}$ para la fibra de sílice fundida [6]. Por consiguiente, sin más medios para la compensación de temperatura, los detectores de corriente de fibra óptica que emplean fibra hilada altamente birrefringente pueden tener una dependencia total de la temperatura que puede alcanzar hasta un pequeño porcentaje/ 100°C .

Descripción de la invención

55 El problema por resolver por la invención presente es, por tanto, proporcionar una fibra y un detector del tipo mencionado anteriormente con reducida sensibilidad a la temperatura.

Este problema se resuelve mediante la fibra y el detector de las reivindicaciones independientes.

En consecuencia, la fibra es una fibra birrefringente hilada que tiene una birrefringencia lineal local $B \neq 0$. En este contexto, la expresión "birrefringencia lineal local" se refiere a la birrefringencia que tiene una fibra no hilada equivalente. Preferiblemente, (pero no necesariamente) la magnitud de la birrefringencia lineal local permanece constante a lo largo de la fibra.

5 La fibra es tal que la dependencia de la temperatura relativa $(1/B) \cdot dB/dT$ de la birrefringencia es mayor que cero para al menos una longitud de onda λ y para al menos una temperatura T comprendida entre -60°C y 120°C .

En otras palabras, el (valor absoluto de) la birrefringencia aumenta conforme aumenta la temperatura, para al menos un régimen de temperatura comprendido entre -60°C y 120°C .

10 Según se analiza a continuación, dicha dependencia positiva de la temperatura relativa conduce a una compensación inherente al menos parcial de la dependencia de la temperatura de la constante de Verdet V del material de fibra.

Ventajosamente, a dicha temperatura T y dicha longitud de onda λ , la fibra tiene una birrefringencia lineal local de al menos $1,3 \cdot 10^{-5}$ o incluso de al menos $2,6 \cdot 10^{-5}$.

15 Además, de nuevo al menos a dicha longitud de onda λ y dicha temperatura T , la velocidad de espín α de la fibra (es decir, la rotación angular en radianes a lo largo de la longitud) es ventajosamente tal que el parámetro $x = 2 \cdot \alpha / \eta$ está comprendido entre 1 y 10, en donde η es el desplazamiento de fase birrefringente lineal local por unidad de longitud dado por $\eta = 2\pi \cdot B / \lambda$. Como se puede ver en la ecuación (2) que se muestra a continuación, un valor demasiado bajo del parámetro x (es decir, una velocidad de espín demasiado baja o una birrefringencia demasiado alta) conduce a un valor muy pequeño del factor de escala de fibra hilada K , es decir, disminuye la sensibilidad del detector. Por otra parte, si el parámetro x es mayor que 10, la fibra se comporta cada vez más como una fibra de baja birrefringencia y pierde su insensibilidad a la tensión mecánica.

20 Según se describe a continuación, una clase ventajosa de fibras que pueden tener una dependencia positiva de la temperatura relativa de la birrefringencia son las fibras microestructuradas. Éstas son fibras que tienen microestructuras embebidas en ellas, en particular cavidades o rebajos a lo largo de la fibra que afectan el índice de refracción efectivo. En particular, la fibra puede comprender cavidades, en particular cavidades llenas de aire, que se extienden a lo largo de la fibra.

25 La al menos una longitud de onda λ donde la dependencia de la temperatura relativa de la birrefringencia es positiva está ventajosamente dentro de un intervalo comprendido entre 400 nm y 2000 nm, en particular entre 1000 nm y 1700 nm, para realizar mediciones usando longitudes de onda convencionales.

30 Además y ventajosamente, la fibra es una fibra monomodo, al menos en dicha al menos una longitud de onda λ . En este contexto, se entiende que una fibra es una fibra monomodo, si solo lleva el modo de fibra fundamental (espacial) que puede consistir en dos submodos polarizados ortogonalmente. Esto hace que la fibra sea adecuada para la mayoría de los métodos de medición basados en fibras.

35 En otra realización ventajosa más, la dependencia de la temperatura relativa $(1/B) \cdot dB/dT$ de dicha birrefringencia es mayor que cero para todas las temperaturas entre -40°C y 85°C , lo que permite realizar mediciones con compensación de temperatura en casi todas las situaciones que ocurren naturalmente.

La invención se refiere además a un detector de corriente que comprende:

- una fibra hilada birrefringente según se ha descrito anteriormente,

- una fuente de luz que genera luz en dicha al menos una longitud de onda λ , y

40 - una unidad de detección estructurada y adaptada para medir el desplazamiento de fase $\Delta\phi$ entre dos modos de polarización que han pasado a través de la fibra.

Por las razones anteriores, la fibra descrita en esta memoria es particularmente adecuada para medir una corriente eléctrica o para medir un campo magnético. Por tanto, la invención se refiere también a dicho uso de la fibra.

45 Otras realizaciones ventajosas se enumeran en las reivindicaciones dependientes o combinaciones de las reivindicaciones, así como en la descripción dada a continuación junto con los dibujos.

Descripción breve de los dibujos

La invención se entiende mejor y los objetivos diferentes de los descritos anteriormente resultarán evidentes a partir de la descripción detallada siguiente de la invención. Dicha descripción se refiere a los dibujos anexos, en donde:

La Figura 1 muestra un diagrama esquemático de un detector de corriente,

La Figura 2 muestra el diseño de una fibra de sílice fundida microestructurada con una dependencia positiva de la temperatura de la birrefringencia para $\Lambda = 1 \mu\text{m}$ y $d = 0,4 \mu\text{m}$ (con los puntos negros que representan huecos de aire mientras que el área blanca representa sílice fundida),

5 La Figura 3 muestra las contribuciones dependientes de la temperatura a la señal del detector derivadas de la birrefringencia constante y de la fibra Verdet y la dependencia de la temperatura global de una señal del detector para el ejemplo dado en la Figura 2,

La Figura 4 muestra una sección transversal esquemática de una fibra con dos contribuciones ortogonales a la birrefringencia lineal total - el eje lento de la birrefringencia desde la estructura de corbata de pajarita está a lo largo de la línea horizontal x_2 , el eje lento de la birrefringencia desde el núcleo elíptico está a lo largo de la línea vertical x_1 .

10 **Modos para realizar la invención**

El nuevo tipo de fibra de detección hilada altamente birrefringente descrita en esta memoria puede ser usado en detectores de corriente de fibra óptica o detectores de campo magnético de diferentes tipos, tales como detectores polarimétricos [1], [10], detectores de corriente basados en el interferómetro de Sagnac [4] y detectores de corriente interferométrica en línea con esquemas basados en la modulación de fase o de interrogación pasiva.

15 La Figura 1 muestra un detector de corriente de fibra óptica, por ejemplo, según se describe en [5] o [13]. Comprende una fuente de luz 1 que genera luz al menos de una longitud de onda λ . Dos modos de polarización de la luz pasan una unidad de detección 2 y a continuación entran en una fibra de mantenimiento de la polarización 3 y un acoplador 4 para llegar a una fibra de detección 5. En la fibra de detección 5, los modos de polarización se propagan a un espejo 6, donde son reflejados para regresar a través de la fibra de detección 5 y de la fibra de mantenimiento de la polarización 3 hacia la unidad de detección 2. En la unidad de detección 2, es medido el desplazamiento de fase $\Delta\phi$ que los dos modos de polarización han obtenido en su viaje a través de la fibra de detección 5.

20 La fibra de detección 5 es enrollada al menos una vez alrededor de un conductor de corriente 7, con un campo magnético que depende de la corriente a su alrededor. La fibra de detección 5 consiste en un material magnetoóptico (típicamente sílice fundida) con una constante de Verdet V no nula.

25 Las personas expertas en la materia conocen varios diseños de tales detectores de corriente de fibra óptica. Los detectores pueden trabajar en reflexión, según se muestra en la Figura 1, es decir, la luz es reflejada desde un espejo al final de la fibra de detección, o pueden trabajar en transmisión, es decir, la luz pasa por la fibra solo una vez y es analizada después de salir del final de la fibra.

30 En la invención presente, la fibra de detección 5 es una fibra hilada birrefringente. Ventajosamente, la fibra de detección 5 es una fibra hilada altamente birrefringente, es decir, una fibra que tiene una birrefringencia lineal $B = n_1 - n_2$ de al menos $1,3 \cdot 10^{-5}$ o incluso de al menos $2,6 \cdot 10^{-5}$.

35 En los detectores de corriente de fibra óptica que emplean fibra hilada altamente birrefringente de la técnica anterior [1], [10], la corriente (o, de manera equivalente, el campo magnético a ser medido) induce un desplazamiento de fase $\Delta\phi$ entre dos modos propios de la fibra. Este desplazamiento de fase $\Delta\phi$ depende linealmente de manera típica de la corriente I a ser medida. En general:

$$\Delta\phi \sim K \cdot V \cdot I, \quad (1)$$

con la tilde (\sim) expresando proporcionalidad y K siendo un factor de escala de fibra hilada, que es 1 para una fibra libre de birrefringencia lineal, pero $K < 1$ para una fibra birrefringente hilada. V es la constante de Verdet de la fibra e I la corriente a ser medida que atraviesa el conductor 7.

40 Para una variedad de detectores de corriente que emplean fibra birrefringente hilada, el factor de escala de fibra hilada K toma la forma:

$$K = (1 + x^2)^{-a}, \quad (2)$$

45 con el parámetro x definido como $x = 2\alpha/\eta$, en donde α es la velocidad de espín (es decir, la rotación angular en radianes sobre la longitud) y η es el desplazamiento de fase modal diferencial por unidad de longitud de los modos de polarización ortogonal de una fibra equivalente no hilada, es decir, fibra birrefringente linealmente. El exponente a es positivo ($a \geq 0$), por ejemplo, $a = 2$ como en la referencia [1].

50 La expresión K conduce a una dependencia adicional de la temperatura de la señal del detector $S(\Delta\phi)$, además de la dependencia de la temperatura del efecto Faraday (constante de Verdet V), que es conocida que es positiva en vidrios diamagnéticos como la sílice fundida. La dependencia de la temperatura relativa del factor de escala K viene dada por:

$$(1/K) \cdot dK/dT = -2a \cdot x^2 \cdot (1 + x^2)^{-1} \cdot (1/\eta) \cdot d\eta/dT \quad (3)$$

Debe tenerse en cuenta que el alargamiento térmico de la fibra cambia igualmente la velocidad de espín y la expresión de desplazamiento de fase birrefringente η y, por tanto, deja sin cambios a x y a K .

Según la ecuación (3), la contribución de la fibra hilada a la dependencia de la temperatura del detector de corriente puede ser ajustada mediante el ajuste de la cantidad η . La birrefringencia lineal local de una fibra hilada, es decir, la diferencia de los índices de refracción para dos estados de polarización lineal ortogonal, viene dada por $B = n_1 - n_2$. El desplazamiento de fase lineal por unidad de longitud equivale a $\eta = 2\pi \cdot B/\lambda$. La dependencia de la temperatura de η viene dada por $(1/\eta) \cdot d\eta/dT = (1/B) \cdot dB/dT$.

De la ecuación (1) se deduce que el desplazamiento de fase por corriente, $\Delta\phi/l$, es proporcional al producto de $K \cdot V$. La dependencia de la temperatura relativa de $\Delta\phi/l$ y, por tanto, la dependencia de la temperatura de la señal del detector $S(\Delta\phi)$ está dada por las dependencias de temperatura relativas del factor de escala de fibra hilada K y la constante de Verdet V . En particular, se deduce de la ecuación (1) que:

$$(l/\Delta\phi) \cdot d(\Delta\phi/l)/dT = [(1/K) \cdot dK/dT + (1/V) \cdot dV/dT] \quad (4)$$

Por tanto, para reducir la dependencia de la temperatura, la dependencia de la temperatura relativa del factor de escala K , es decir $(1/K) \cdot dK/dT$, debe tener un signo opuesto y una magnitud similar a la dependencia de la temperatura relativa de la constante de Verdet V , es decir, $(1/V) \cdot dV/dT$. En este caso, el valor absoluto de la dependencia de la temperatura relativa de $K \cdot V$ es menor que el valor absoluto de la dependencia de la temperatura relativa de V solamente, es decir.

$$|(1/K) \cdot dK/dT + (1/V) \cdot dV/dT| < |(1/V) \cdot dV/dT|$$

Como $(1/V) \cdot dV/dT$ es positivo, $(1/K) \cdot dK/dT$ debe ser negativo. Por tanto, se deduce de la ecuación. (3) que $(1/\eta) \cdot d\eta/dT = (1/B) \cdot dB/dT$ debe ser positivo.

En algunos tipos de fibra hilada, la birrefringencia local es conseguida mediante cuerpos de tensión (por ejemplo, regiones de tensión del tipo panda o de corbata de pajarita) en el revestimiento de fibra. Esta tensión resulta de los diferentes coeficientes de expansión de temperatura de las regiones de revestimiento de fibra sin dopar y de los cuerpos de tensión típicamente dopados con B_2O_3 , es decir, es generado un campo de tensión permanente en la fibra mientras se enfría debido a la temperatura de estiramiento. Con el aumento de la temperatura, se libera la tensión. En consecuencia, la birrefringencia de tales tipos de fibras disminuye generalmente con el aumento de la temperatura (véase, por ejemplo, [7] para el caso de fibra birrefringente lineal no hilada), es decir, una fibra hilada con birrefringencia inducida por cuerpos de tensión en el revestimiento típicamente añade, según las ecuaciones. (3) y (4), una contribución positiva a la dependencia de la temperatura de la señal S , además de la contribución positiva de la constante de Verdet.

La dependencia de la temperatura de la birrefringencia de la fibra birrefringente lineal no hilada ha sido estudiada intensamente. Especialmente, se mostró el predominio de la dependencia negativa de la temperatura de la birrefringencia inducida por la tensión [7], [8].

En las fibras elípticas del núcleo, la birrefringencia proviene de la forma elíptica del núcleo, y la dependencia de la temperatura está determinada por la variación de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento con la temperatura, así como por la relajación de la tensión residual. Comúnmente, esta última predomina en general [8]. En consecuencia, las fibras elípticas hiladas muestran también una disminución de su birrefringencia lineal con la temperatura y, por tanto, añaden también una contribución positiva a la dependencia de la temperatura de la señal del detector [ecuaciones (3) y (4)].

Por el contrario, es bien conocido que con sílice pura, la birrefringencia inducida por la tensión de las fibras birrefringentes lineales microestructuradas, que típicamente muestra una dependencia negativa de la temperatura, se reduce fuertemente y, en consecuencia, la birrefringencia es principalmente debida a la geometría particular de la fibra. La dependencia de la temperatura puede ser significativamente menor que la de las fibras con birrefringencia inducida por tensión. En la referencia 11, se usó fibra de detección birrefringente hilada microestructurada para minimizar la dependencia de la temperatura, es decir, el término $|(1/\eta) \cdot d\eta/dT|$, en comparación con la fibra hilada con birrefringencia inducida por la tensión.

Por tanto, se puede utilizar una fibra birrefringente altamente hilada microestructurada para la detección de corriente diseñada de manera que el término $(1/K) \cdot dK/dT$ se hace negativo (es decir $(1/\eta) \cdot d\eta/dT$ y $(1/B) \cdot dB/dT$ son positivos) y equilibra al menos parcialmente la dependencia positiva de la temperatura de la constante de Verdet V . Como resultado, el desplazamiento de fase magnetoóptico detectado (señal del detector) se hace menos dependiente de la temperatura.

Una transferencia de la comprensión detallada de la birrefringencia lineal en la fibra microestructurada no hilada [9] ayuda a diseñar la dependencia de la temperatura de la birrefringencia de la fibra microestructurada hilada para lograr este objetivo.

La Figura 2 muestra una realización de una fibra de detección perforada 5 que comprende un cuerpo de vidrio 8 con cavidades que se extienden longitudinalmente 9. Otros diseños de fibra posibles se ofrecen en [9].

La birrefringencia lineal B de un diseño de fibra de agujeros hilada dada depende de la longitud de onda λ , de los índices de refracción n_{glass} del vidrio y del hueco del material de relleno de la cavidad (típicamente aire), respectivamente, del paso de la cavidad Λ y del diámetro de la cavidad d: $B(\lambda, n_{\text{glass}}, n_{\text{hole}}, \Lambda, d/\Lambda)$. La dependencia de la temperatura de la birrefringencia lineal en la fibra hilada es:

$$\begin{aligned} dB/dT = & dB/dn_{\text{glass}} \times dn_{\text{glass}}/dT + \\ & dB/dn_{\text{hole}} \times dn_{\text{hole}}/dT + \\ & dB/d\Lambda \times (Y_{\text{glass}} \Lambda), \end{aligned} \quad (4)$$

10 donde Y_{glass} es el coeficiente de expansión térmica del vidrio. El coeficiente termoóptico de aire $dn_{\text{air}}/dT \approx -10^{-6} \text{ K}^{-1}$ es típicamente pequeño, de manera que el primer término de la ecuación (4) predomina sobre los otros dos [9]. El signo del primer término está determinado por los signos de los términos dB/dn_{glass} y dn_{glass}/dT . La cantidad de dB/dn_{glass} depende del diseño geométrico de la fibra. La cantidad dn_{glass}/dT depende en gran medida del tipo de vidrio usado, por ejemplo. $dn_{\text{SiO}_2}/dT \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ para sílice fundida [9] y la mayoría de las lentes ópticas disponibles muestran $dn_{\text{glass}}/dT >$
15 0. Hay también una gama de lentes ópticas comerciales con $dn_{\text{glass}}/dT < 0$ como N-FK5, N-FK51A, N-PK52A, P-PK53, N-PSK53A, N-LAK12, N-SF6, N-SF10, N-SF14, N-SF57, N-SF66, P-SF8 [12].

Por tanto, en una realización, la fibra puede exhibir una combinación de valores $dB/dn_{\text{glass}} < 0$ y $dn_{\text{glass}}/dT < 0$, mientras que en otra realización, la fibra puede exhibir una combinación de valores $dB/dn_{\text{glass}} > 0$ y $dn_{\text{glass}}/dT > 0$. En ambos casos, se desprende de la ecuación (4) que dB/dT es positivo.

20 La dependencia de la temperatura de la birrefringencia lineal en fibras perforadas sin hilar ha sido estudiada en detalle mostrando que, al diseñar la composición del vidrio y/o la estructura de la fibra, se puede conseguir una dependencia de temperatura positiva, cero o negativa de la birrefringencia de la fibra sin hilar [9].

Se ha mostrado en la referencia [9] que la birrefringencia B como función de n_{glass} alcanza para un diseño como el de la Figura 2 un máximo local a un $n_{\text{glass,max}}$ dado. En consecuencia, el signo del primer término de la ecuación (4) puede ser positivo (para $n_{\text{glass}} < n_{\text{glass,max}}$ y $dn_{\text{glass}}/dT > 0$ o para $n_{\text{glass}} > n_{\text{glass,max}}$ y $dn_{\text{glass}}/dT < 0$) o negativo (para $n_{\text{glass}} >$
25 $n_{\text{glass,max}}$ y $dn_{\text{glass}}/dT > 0$ o para $n_{\text{glass}} < n_{\text{glass,max}}$ y $dn_{\text{glass}}/dT < 0$).

El valor para $n_{\text{glass,max}}$ donde B alcanza un máximo depende de la estructura de la fibra, mientras que n_{glass} puede ser ajustado por la composición del vidrio. En consecuencia, dB/dT se puede diseñar para que sea positiva mediante la elección apropiada de la geometría de la fibra, así como de la composición del vidrio. La estructura de fibra dada en la Figura 2 muestra una dependencia positiva de la temperatura de la birrefringencia a lo largo de un amplio intervalo de longitud de onda de $0,5 \mu\text{m} - 1,5 \mu\text{m}$ cuando se usa sílice fundida; por ejemplo, a una longitud de onda $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$, esta estructura muestra una dependencia relativa de la temperatura de aproximadamente $(1/\eta) \cdot dn/dT + 0,4 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y $\eta \approx 4,8 \text{ mm}^{-1}$ [9]. Establecer la velocidad de espín de la fibra hilada en $\alpha = 0,75\eta$ da como resultado para $a = 2$ una dependencia de la temperatura de la señal del detector de corriente de fibra hilada [véase la ecuación (3)] de:

$$(1/K) \cdot dK/dT \approx -1,2 \cdot (1/\eta) \cdot dn/dT \approx -0,5 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1},$$

es decir, la dependencia de la temperatura de la constante de Verdet V ($+0,7 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) es compensada dentro de $\pm 0,1\%$ sobre 100°C según se ilustra en la Figura 3.

Ventajosamente, la dependencia de la temperatura de la birrefringencia es tal que $(1/B) \cdot dB/dT$ está comprendida entre $0,1 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$ y $2 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ o entre $0,05 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$ y $5 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$, en cuyo caso la dependencia típica de la temperatura de la constante de Verdet es compensada de manera más efectiva.

Otras realizaciones de una fibra hilada altamente birrefringente con la propiedad deseada de $(1/B) \cdot dB/dT > 0$ comprenden - según se describe a continuación - (i) fibras hiladas con dos contribuciones ortogonales a la birrefringencia lineal local total y (ii) fibras de núcleo elípticas hiladas con una contribución de birrefringencia insignificante debida a la tensión mecánica.

45 (i) La birrefringencia B de esta realización de una fibra es generada mediante una superposición de dos contribuciones de birrefringencia ortogonales B1 y B2. En el intervalo de temperatura designado, la contribución B1 excede la contribución B2, de manera que los ejes rápido y lento de la birrefringencia general B están alineados con la contribución de birrefringencia B1 y asciende a $B = B1 - B2$. La dependencia de la temperatura de la contribución de birrefringencia más pequeña $dB2/dT$ es negativa, por ejemplo, porque se origina en la birrefringencia inducida por la tensión, y es elegida de manera que sea menor que $dB1/dT$, es decir, $dB2/dT < dB1/dT$, en el intervalo de temperatura designado. La dependencia de la temperatura de la birrefringencia global es calculada consecuentemente con: $dB/dT = dB1/dT - dB2/dT > 0$. Las cantidades B1, B2, $dB1/dT$, $dB2/dT$ pueden ser elegidas adecuadamente para diseñar B y dB/dT en el intervalo de temperatura designado.

La Figura 4 muestra una sección transversal ejemplar de dicha fibra. Comprende un núcleo 10 rodeado por un revestimiento 12, el núcleo 10 tiene un índice de refracción mayor que el revestimiento 12. Típicamente, el núcleo 10 está formado por una región que tiene un nivel de dopante más alto que el revestimiento 12.

5 El núcleo 10 tiene una dirección del eje alargado X1, que designa la dirección de la extensión radial mayor del núcleo 10. En una dirección X2 perpendicular a la dirección del eje alargado X1, dos cuerpos de tensión 11 formados, por ejemplo, por una estructura de corbata de pajarita están embebidos en el revestimiento 12. Los cuerpos de tensión pueden estar formados por regiones que tienen un nivel de dopante más alto que el resto del revestimiento 12. No están presentes tales cuerpos de tensión a lo largo de la dirección del eje alargado X1. En este contexto, la expresión "cuerpo de tensión" designa una región en la que, al menos una temperatura T, da lugar a tensión mecánica dentro del revestimiento 12.

10 En esta realización, las birrefringencias B1 están dadas por el núcleo elíptico 10 y B2 es originado a partir de los cuerpos de tensión, es decir, de la estructura de corbata de pajarita 11. Aquí, ambos términos $dB1/dT$ y $dB2/dT$ son típicamente negativos, pero el valor absoluto de $dB2/dT$ puede ser, por ejemplo, cinco veces mayor que el valor absoluto de $dB1/dT$, de manera que la birrefringencia total B crece con el aumento de la temperatura. Las dos contribuciones de birrefringencia pueden en general ser introducidas por todos los medios de diseño mencionados anteriormente, es decir, revestimiento elíptico, núcleo elíptico, microestructuración, cuerpos de tensión en el revestimiento de fibra (por ejemplo, de panda o de corbata de pajarita).

15 (ii) La interacción de la birrefringencia inducida por la tensión y la geometría en fibras de núcleo elíptico no hiladas está bien descrita en la técnica anterior [8]. Mientras que típicamente la contribución inducida por la tensión predomina y, en consecuencia, la birrefringencia general muestra una dependencia negativa de la temperatura, es decir, $dB/dT < 0$, hay intervalos de parámetros donde la contribución inducida por la tensión B_{stress} se vuelve insignificante (véase la Figura 5 de la referencia [8]). La dependencia de la temperatura de la contribución inducida de la geometría B_{geo} depende de la dependencia de la temperatura de la diferencia del índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento, $d(n_{\text{core}} - n_{\text{cladding}})/dT$, y en el caso de la composición de vidrio más común para las fibras (revestimiento SiO_2 , núcleo $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$), la birrefringencia inducida por la geometría es positiva (véase la Figura 6 de la referencia [8]). En consecuencia, hacer que la preforma tenga un movimiento de espín de una fibra de núcleo elíptico diseñada consecuentemente durante el proceso de estirado da como resultado una fibra hilada con $dB/dT > 0$.

20 Si bien se han mostrado y descrito realizaciones de la invención preferidas en la actualidad, debe entenderse claramente que la invención no está limitada a las mismas sino que, por el contrario, pueden ser realizadas y practicadas de otra manera dentro del alcance de las reivindicaciones siguientes.

Referencias:

1. R. I. Laming and D. N. Payne, "Electric current detectors employing spun highly birefringent optical fibers," *Journal of Lightwave Technology* 7, 2084-2094 (1989).
2. J. Noda, K. Okamoto, and Y. Sasaki, "Polarization-maintaining fibers and their applications," *Journal of Lightwave Technology* 4, 1071-1089 (1986).
3. A. Michie, J. Canning, I. Bassett, J. Haywood, K. Digweed, M. Aslund, B. Ashton, M. Stevenson, J. Digweed, A. Lau, and D. Scandurra, "Spun elliptically birefringent photonic crystal fibre," *Optics Express* 15, 1811-1816 (2007).
4. I. G. Clarke, "Temperature-stable spun elliptical-core optical-fiber current transducer," *Optics Letters* 18, 158-160 (1993).
5. WO 2007/121592
6. P. A. Williams, A. H. Rose, G. W. Day, T. E. Milner, and M. N. Deeter, "Temperature dependence of the Verdet constant in several diamagnetic glasses," *Applied Optics* 30, 1176-1178 (1991).
7. A. Ourmazd, M.P. Varnham, R.D. Birch, and D.N. Payne, "Thermal properties of highly birefringent optical fibers and preforms," *Applied Optics* 22, 2374-2379 (1983).
8. W. Urbanczyk, T. Martynkien, and W. J. Bock, "Dispersion Effects in Elliptical-Core Highly Birefringent Fibers," *Applied Optics* 40, 1911-1920 (2001).
9. T. Martynkien, M. Szpulak, and W. Urbanczyk, "Modeling and measurement of temperature sensitivity in birefringent photonic crystal hole fibers," *Applied Optics* 44, 7780-7788 (2005).
10. J. R. Qian, Q. Guo, and L. Li, "Spun linear birefringence fibres and their sensing mechanism in current detectors with temperature compensation," *IEE Proc.-Optoelectron.* 141, 373-380 (1994).
11. A. Michie, J. Canning, I. Bassett, J. Haywood, K. Digweed, B. Ashton, M. Stevenson, J. Digweed, A. Lau, and D. Scandurra, "Spun elliptically birefringent photonic crystal fibre for current sensing," *Measurement Science and Technology* 18, 3070 (2007).

12."Optical Glass - Data Sheets," (Schott North America Inc., 2013).

13. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, and H. Brandle, "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current detector," *Journal of Lightwave Technology* 20, 267-276 (2002).

Números de referencia:

- 5 1: fuente de luz
- 2: unidad de detección
- 3: fibra de mantenimiento de polarización
- 4: convertidor de polarización
- 5: detección de fibra
- 10 6: espejo
- 7: conductor de corriente
- 8: cuerpo de vidrio
- 9: cavidades
- 10: núcleo elíptico
- 15 11: estructura de corbata de pajarita
- 12: revestimiento
- X1, X2: direcciones del eje de núcleo

REIVINDICACIONES

1. Una fibra birrefringente hilada que tiene una birrefringencia lineal local $B \neq 0$, en donde una dependencia de la temperatura relativa $(1/B) \cdot dB/dT$ de dicha birrefringencia es mayor que cero para al menos una longitud de onda λ , y para al menos una temperatura T comprendida entre -60°C y 120°C .
- 5 2. La fibra de la reivindicación 1 en donde, al menos a dicha longitud de onda λ , y a dicha temperatura T , una velocidad de espín α de dicha fibra es tal que $2 \cdot \alpha/\eta$ está comprendida entre 1 y 10, en donde η es un desplazamiento de fase birrefringente por unidad de longitud asociada a la birrefringencia lineal local B y viene dado por $\eta = 2\pi \cdot B/\lambda$.
3. La fibra de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dicha fibra es una fibra microestructurada, comprendiendo cavidades (9), en particular cavidades llenas de aire (9), que se extienden a lo largo de dicha fibra.
- 10 4. La fibra de la reivindicación 3, en donde dicha fibra es de un vidrio que tiene un índice de refracción n_{glass} y en donde, al menos a dicha temperatura T y a dicha longitud de onda λ ,
- (a) $dB/dn_{\text{glass}} < 0$ y $dn_{\text{glass}}/dT < 0$,
- o
- (b) $dB/dn_{\text{glass}} > 0$ y $dn_{\text{glass}}/dT > 0$.
- 15 5. La fibra de una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2 comprendiendo un núcleo elíptico (10) y un revestimiento (12), en donde al menos a dicha longitud de onda y a dicha temperatura una birrefringencia inducida por tensión B_{stress} es menor que una birrefringencia introducida por geometría B_{geo} : $|B_{\text{stress}}| < |B_{\text{geo}}|$.
6. La fibra de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes en donde dicha birrefringencia lineal local B está compuesta de dos contribuciones de birrefringencia distintas B_1 y B_2 que tienen ejes lentos ortogonales al menos a dicha longitud de onda y temperatura con $|B_1| > |B_2|$ y $dB_2/dT < dB_1/dT$.
- 20 7. La fibra de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes comprendiendo un núcleo elíptico (10) rodeado por un revestimiento (12), en donde dicho núcleo elíptico (10) tiene un índice de refracción mayor que dicho revestimiento (12), y en donde al menos dos cuerpos de tensiones (11) están situados en dicho revestimiento (12) a lo largo de una dirección (X2) perpendicular a una dirección del eje alargada (X1) de dicho núcleo (10), y en particular en donde dichos
- 25 cuerpos de tensión (11) están formados por regiones que tienen mayor nivel de dopante que el resto de dicho revestimiento (12).
8. La fibra de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde la dependencia de la temperatura de la birrefringencia es tal que $(1/B) \cdot dB/dT$ está entre $0,1 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$ y $2 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ o entre $0,05 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$ y $5 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$.
9. La fibra de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dicha fibra es de un vidrio diamagnético, en particular sílice fundida.
- 30 10. La fibra de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dicha al menos una longitud de onda está comprendida dentro de un intervalo de entre 400 nm y 2000 nm, en particular de entre 1000 nm y 1700 nm.
11. La fibra de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dicha fibra es, al menos a dicha al menos una longitud de onda λ , una fibra monomodo.
- 35 12. La fibra de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde dicha dependencia de temperatura relativa $(1/B) \cdot dB/dT$ de dicha birrefringencia es mayor que cero para todas las temperaturas entre -40°C y 85°C .
13. La fibra de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde, a dicha temperatura T y a dicha longitud de onda λ , la fibra tiene una birrefringencia lineal local de al menos $1,3 \cdot 10^{-5}$, en particular de al menos $2,6 \cdot 10^{-5}$.
- 40 14. La fibra de la reivindicación 1, en donde la birrefringencia lineal local $B = n_1 - n_2$ está dada por la diferencia de los índices de refracción n_1, n_2 para dos estados de polarización lineal ortogonal.
15. Un detector de corriente comprendiendo:
- una fibra birrefringente hilada (5) de cualquiera de las reivindicaciones precedentes,
- una fuente de luz (1) que genera luz a dicha al menos una longitud de onda λ , y
- una unidad de detección (2) que mide un desplazamiento de fase $\Delta\phi$ entre dos modos de polarización que han pasado
- 45 a través de dicha fibra (5).
16. El detector de corriente de la reivindicación 15, en donde dicho desplazamiento de fase está dado por:

$$\Delta\phi \sim K \cdot V \cdot I,$$

siendo K un factor de escala de fibra hilada, siendo V la constante de Verdet y siendo I la corriente a ser medida, y en donde:

$$\left| \left(\frac{1}{K} \right) \cdot \frac{dK}{dT} + \left(\frac{1}{V} \right) \cdot \frac{dV}{dT} \right| < \left| \left(\frac{1}{V} \right) \cdot \frac{dV}{dT} \right| .$$

- 5 17. El uso de la fibra de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14 para medir una corriente eléctrica o un campo magnético.

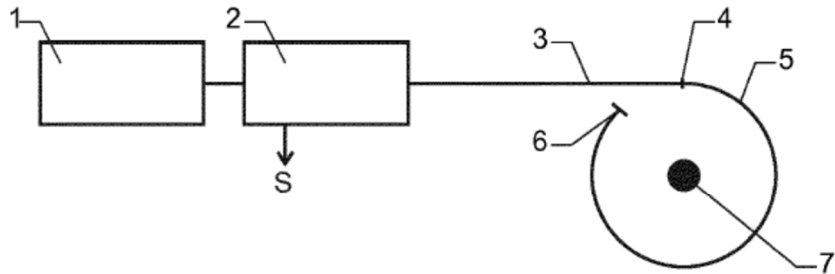


Fig. 1

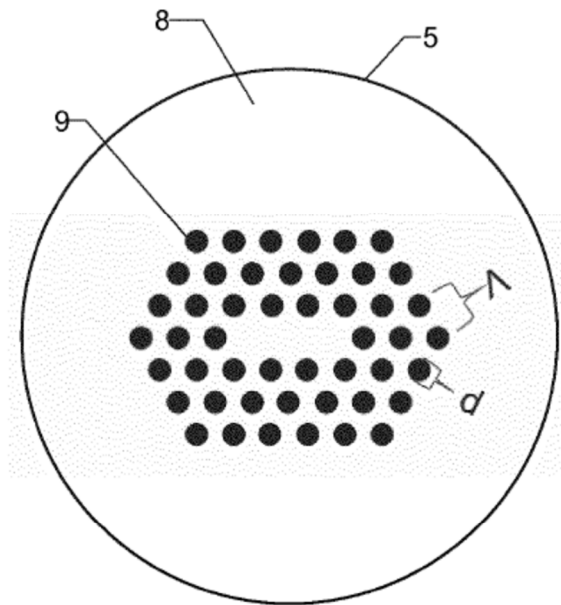


Fig. 2

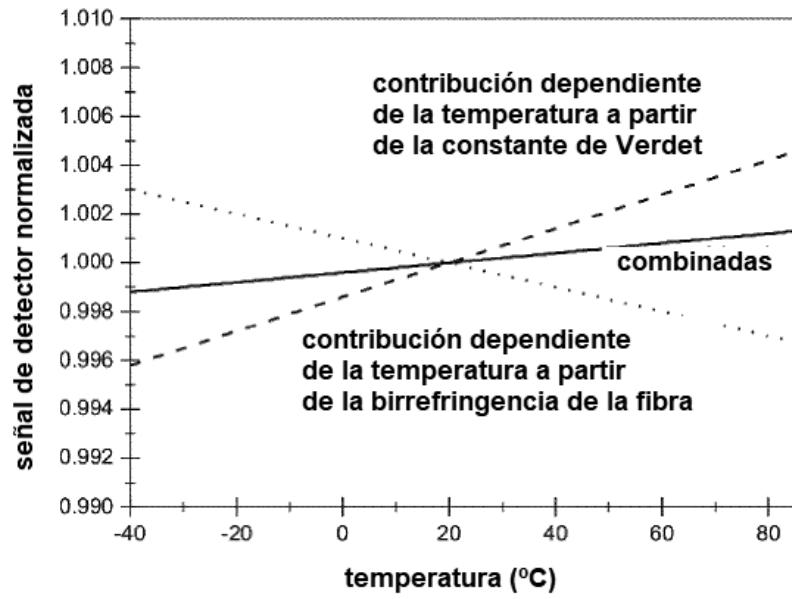


Fig. 3

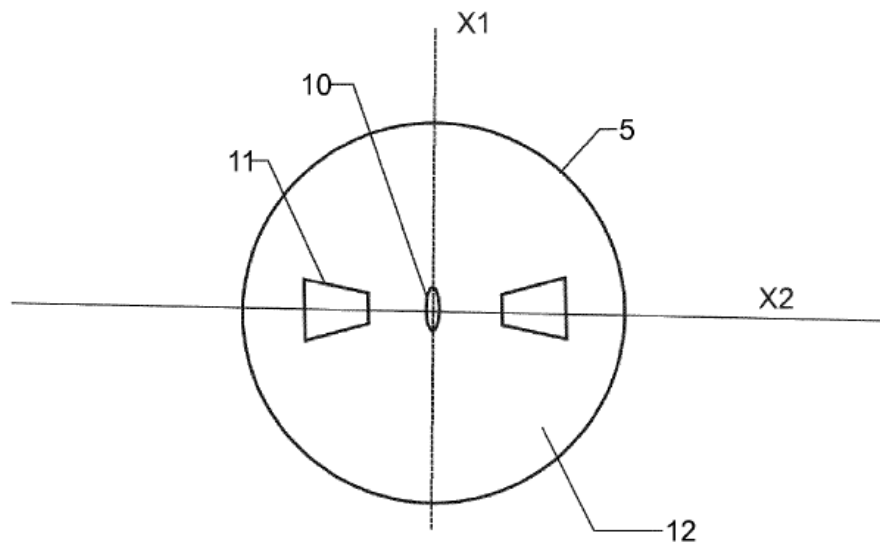


Fig. 4