

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 668 022**

51 Int. Cl.:

**G01N 21/21** (2006.01)

**A61B 1/07** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.02.2015 PCT/EP2015/053437**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.09.2015 WO15139907**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.02.2015 E 15709113 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.01.2018 EP 3120134**

54 Título: **Dispositivo y método de caracterización polarimétrica desplazada**

30 Prioridad:

**18.03.2014 FR 1452244**

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

**16.05.2018**

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE (C.N.R.S.) (50.0%)  
3, rue Michel-Ange  
75794 Paris Cedex 16, FR y  
ECOLE POLYTECHNIQUE (50.0%)**

72 Inventor/es:

**PAGNOUX, DOMINIQUE;  
VIZET, JÉRÉMY;  
MANHAS, SANDEEP;  
VANEL, JEAN-CHARLES;  
DEBY, STANISLAS y  
DE MARTINO, ANTONELLO**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 668 022 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Dispositivo y método de caracterización polarimétrica desplazada

**Estado de la técnica**

**Dominio técnico**

5 La presente descripción se refiere a un método y un dispositivo de caracterización polarimétrica desplazada por fibra óptica y se aplica particularmente a la endoscopia para la caracterización polarimétrica in vivo de tejidos biológicos.

**Estado de la técnica**

Es conocido el hecho de describir el estado de polarización de una onda electromagnética (incluyendo particularmente la luz visible) por un conjunto de cuatro valores denominados parámetros de Stokes, a menudo representados bajo la forma de un vector, el vector de Stokes  $\vec{S}$ :

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_G - I_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

El vector de Stokes comprende cuatro componentes generalmente representados como  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  y que describen respectivamente la intensidad total  $I$  del haz ( $I = I_x + I_y$ ), las diferencias entre los componentes horizontal y vertical del campo eléctrico ( $I_x - I_y$ ), a  $\pm 45^\circ$  ( $I_{45^\circ} - I_{-45^\circ}$ ) y circulares izquierdo y derecho ( $I_G - I_D$ ). Permiten describir de manera completa la luz no polarizada, parcialmente polarizada y totalmente polarizada.

La esfera de Poincaré es una representación gráfica de la polarización de la luz, cuyo ejemplo está ilustrado en la fig. 1A. Un vector de Stokes genérico está representado por sus coordenadas reducidas  $q=Q/I$ ,  $u=U/I$  y  $v=V/I$  que definen el estado de polarización independientemente de la intensidad global. Los estados totalmente polarizados se encuentran sobre la superficie de la esfera, de radio unidad (por ejemplo, el punto referenciado A en la fig. 1A). Los estados parcialmente polarizados, cuyo grado de polarización  $p$  es definido por:

$$p = q^2 + u^2 + v^2 \quad (2)$$

se sitúan en el interior de la esfera, a una distancia  $p < 1$  del centro (por ejemplo, el punto referenciado B en la fig. 1A). Las coordenadas polares  $\epsilon$  y  $\theta$  definen respectivamente la forma elíptica y el azimut del eje mayor de una polarización generalmente elíptica tal como se ha representado en la fig. 1B.

La fig. 1C muestra así ejemplos de vectores de Stokes de ondas polarizadas, de polarizaciones dadas, respectivamente de los vectores de Stokes correspondientes a una polarización lineal horizontal (H), una polarización lineal vertical (V), polarizaciones lineales orientadas a  $\pm 45^\circ$  (P y M), polarizaciones circulares derecha (R) e izquierda (L) y una polarización elíptica (A) estando cada uno de los estados de polarización correspondiente representado por ejemplo por un punto sobre la esfera de Poincaré representada en la fig. 1A.

La matriz de Mueller de una muestra es un conjunto de 16 datos que determinan completamente la respuesta polarimétrica de esta muestra y constituyen un medio de caracterización estructural de ésta. La técnica que permite medir esta matriz, denominada "polarimetría de Mueller", consiste en iluminar la muestra con al menos cuatro estados de polarización diferentes y analizar los estados de polarización reenviados, como se ha ilustrado en la fig. 2. Más precisamente, una fuente de emisión luminosa, por ejemplo, un láser o un diodo láser, permite el envío de un haz luminoso en un dispositivo llamado "generador de estados de polarización" o PSG (según la abreviación de la expresión anglosajona «Polarization State Generator») para generar cuatro estados de polarización luminosos dados y conocidos ("estados de polarización de sonda"), cada uno definido por un vector de Stokes tal como se ha descrito precedentemente. El PSG está constituido por ejemplo de una sucesión de polarizadores y de láminas de retardo las cuales pueden cambiar las características por ejemplo por un control eléctrico. Estas láminas pueden por ejemplo estar constituidas de láminas de cristales líquidos orientadas por la aplicación de una tensión eléctrica de control. Para cada uno de los cuatro estados de polarización que salen del PSG, se analiza el estado de polarización de la luz reenviada por la muestra con la ayuda de un "analizador de estados de polarización" o PSA (según la abreviación de la expresión anglosajona «Polarization State Analyser»). El PSA permite medir la intensidad de la onda luminosa reenviada a través de cuatro filtros de polarización que pueden ser idénticos a los que han permitido generar los estados de polarización de sonda. Por ejemplo, el PSA puede ser «la imagen reflejada en un espejo» del PSG, con los mismos componentes, pero atravesados en el orden inverso. El PSA puede ser igualmente diferente

del PSG, pero en todo caso, debe realizar al menos cuatro filtros de polarización diferentes para determinar completamente el vector de Stokes de la luz que emerge de la muestra. Finalmente, se realizan así al menos 16 mediciones de intensidad que permiten construir la matriz de Mueller de la muestra.

5 Diferentes estudios han mostrado cómo el análisis de los coeficientes de la matriz de Mueller permite volver a las informaciones polarimétricas que se refieren a la muestra caracterizada (birrefringencias lineal y circular, diferencia de atenuación (o dicroísmo) lineal y circular, índices de despolarización). Por ejemplo, Lu y Chipman (S. Lu y col. «Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition», J. Opt.Soc. Am. A13, 1106-1113 (1996)) han demostrado que es posible descomponer una matriz de Mueller no degenerada en un producto de matrices, estando caracterizada cada una de un efecto óptico específico, a saber la despolarización (reducción del grado de polarización tal como se ha definido en la ecuación (2) anterior durante la interacción con la muestra), el retardo lineal o circular (o retardo de fase introducido entre dos estados de polarización lineal ortogonales o circulares opuestos) y la diferencia de atenuación lineal o circular (o diferencia de transmisión introducida entre dos estados de polarización lineal ortogonales o circulares opuestos).

15 Las informaciones polarimétricas permiten entonces determinar sobre muestras biológicas informaciones sobre la estructura físico química de los materiales analizados. Por ejemplo, la despolarización, que representa al efecto más importante en los tejidos gruesos (distintos de los del ojo), es debida principalmente a la difusión múltiple de la luz sobre objetos tales como las fibras o nódulos de colágeno, los órganos intracelulares, los núcleos, etc. El retardo lineal se observa sobre tejidos delgados (láminas histológicas) o gruesos en presencia de proteínas fibrilares, tales como el colágeno I, si estas fibras presentan una orientación preferencial. La diferencia de atenuación es insignificante en general, salvo en el caso de tejidos observados bajo incidencia rasante, donde el hecho de atravesar la interfaz puede crear una diferencia de atenuación significativa, siendo la polarización en el plano de incidencia mejor transmitida que la perpendicular a este plano.

25 Así, estudios *ex vivo* de muestras de colon (véase A. Pierangelo y col. Opt. Express 19, 1582-1593 (2011)) se ha mostrado que estas muestras se comportan como despolarizadores puros, y que la despolarización proporciona contrastes útiles para la detección de tumores en una etapa precoz (despolarizándose menos que el tejido sano que lo rodea), para la evaluación del grado de penetración de tumores más avanzados o aún para la detección de tumores residuales después de radio-quimioterapia (A. Pierangelo y col. J Biomed. Opt 18, 046014 (2013)). En el caso del análisis de los tejidos del cuello uterino (A. Pierangelo y col. J Biomed. Opt Express 21, 14120-30 (2013)), se observa a la vez despolarización y retardo, estando este último presente únicamente en las zonas sanas, el cual constituye por tanto un marcador eficaz. La despolarización, permite distinguir las zonas sanas de las que presentan lesiones precancerosas (displasias). La solicitud de documento publicado WO 2007003840 muestra como la polarimetría de Mueller puede ser añadida como complemento de una colposcopia, es decir un microscopio binocular de gran distancia de trabajo destinado al examen detallado del cuello uterino *in vivo*.

35 Para el análisis de objetos biológicos *in vivo*, o de manera más general cualquier objeto de difícil acceso, hay un interés evidente en la realización de la caracterización polarimétrica desplazada, que permite desplazar el objeto para analizar los conjuntos fuente/PSG por una parte y PSA/detección/análisis por otra parte. Tal caracterización desplazada puede hacerse por medio de una guía de luz como una fibra óptica, por ejemplo. En este caso, se conocen los estados de polarización enviados por el PSG en la fibra óptica en dirección del objeto, y se puede analizar con el PSA los estados de polarización de la luz que proviene del objeto, después de que hayan atravesado la fibra óptica de vuelta. Pero esta fibra óptica induce perturbaciones de los estados de polarización de la luz que la atraviesa, tanto a la ida (trayecto fuente-objeto de interés) como a la vuelta (trayecto objeto-sistema de detección y análisis). Estas perturbaciones, imprevisibles, incontrolables, son muy dependientes del acondicionamiento de la fibra óptica (curvaturas, giros, ...) y del medio ambiente (temperatura, ...). Las perturbaciones impiden conocer los estados de polarización realmente incidentes sobre el objeto, y evitar el acceso a los estados de polarización que este objeto reenvía en la fibra óptica para el analizador. En estas condiciones, no es posible la caracterización del objeto por polarimetría de Mueller.

Se han propuesto soluciones recientemente para tratar de librarse de las perturbaciones inducidas por la fibra óptica, o más generalmente por la guía de onda utilizada para desplazar el objeto a analizar, con el fin de acceder a informaciones polarimétricas de una muestra.

50 En la solicitud de patente publicado FR 2941047, una onda polarizada linealmente es enviada a través de un dispositivo capaz de engendrar un gran número de estados de polarización bien distribuidos sobre la esfera de Poincaré, siendo estos estados de polarización enviados a través de una guía de onda, y luego reflejados sobre el objeto, y siendo la polarización de la onda reflejada analizada después de haber atravesado la guía de onda de vuelta. Un rotador de Faraday está posicionado por el lado distal, es decir por el lado de la extremidad de la guía de onda en la que se encuentra el objeto a analizar, permitiendo el rotador de Faraday una rotación de 45° de la polarización. Este rotador de Faraday tiene por efecto compensar, para cada estado de polarización enviado sobre el objeto, el retardo introducido por la fibra. Para cada uno de estos estados de polarización de sonda, se mide la fracción  $F$  de la intensidad detectada a la vuelta, llevada por la polarización paralela a la polarización lineal enviada. Del conjunto de fracciones  $F$  medidas, dependientes de los estados de polarización de sonda, se determina el valor mínimo  $F_{\min}$  y el valor máximo  $F_{\max}$  a partir de los cuales se deducen los índices de despolarización y el retardo de la fase inducidos por el objeto. Sin embargo, no se puede tener acceso gracias a esta técnica a la diferencia de

atenuación o al dicroísmo circular de la muestra.

Más recientemente, se ha descrito un dispositivo de medición polarimétrica a través de una fibra mono-modo (véase por ejemplo la solicitud de patente FR 2977033 de Alouni y col.) que permite detectar si se ha roto la ortogonalidad de dos polarizaciones incidentes sobre el objeto de análisis, lo que puede ser debido a la despolarización o a la diferencia de atenuación debida al objeto, pero sin poder hacer distinción entre estos dos efectos. Además, el retardo eventualmente introducido por el objeto no se puede medir por este procedimiento.

El artículo de Wood y col. (T.C. Wood y col. «Polarization response measurement and simulation of rigid endoscopes», Biomedical Optics express 463, Vol. 1, N°2 (2010)) pone en evidencia y caracteriza en endoscopios rígidos comerciales (llamados de otro modo laparoscopios) efectos de birrefringencia particularmente, que son atribuidos a una ventana de entrada en zafiro. El artículo sugiere reemplazar el zafiro por un material no birrefringente y compatible con las solicitudes unidas a la esterilización para limitar estos efectos de birrefringencia y permitir caracterizaciones polarimétricas completas desplazadas sobre muestras in vivo. Pueden no obstante subsistir efectos de birrefringencia residuales que pueden ser molestos, especialmente si varían en el tiempo o con la posición del instrumento.

Qi y col. Describen igualmente un laparoscopio equipado de un polarizador lineal en la extremidad distal y una rueda de polarizadores lineales a diferentes orientaciones en el lado proximal (Qi y col., «Narrow band 3X3 Mueller polarimetric endoscopy», Biomedical Optic Express, vol. 4 n° 11, (2013)). Este aparato permite la adquisición de matrices de Mueller parciales, limitadas a las tres primeras líneas y tres primeras columnas, mediante la rotación del instrumento alrededor de su eje para hacer variar la orientación del polarizador en la detección. Esta aproximación presenta dos limitaciones: por una parte, no se tiene acceso a los retardos y diferencias de atenuación circulares, y por otra parte la rotación del instrumento alrededor de su eje es realmente poco práctica en condiciones reales de examen, en razón, particularmente, de la necesidad de realizar esta rotación alrededor del eje del endoscopio con una excelente precisión, para evitar que la imagen se desplace en el campo entre dos adquisiciones. Incluso si se cumple esta condición, se puede temer que se produzcan deformaciones «no rígidas» de los órganos examinados in vivo en el curso de la rotación, lo que puede descalificar el método en un buen número de situaciones.

La presente invención propone un método y un sistema de caracterización desplazada que permite acceder por medio de una fibra óptica flexible, a una caracterización de la matriz de Mueller completa de una muestra. Es así posible tener acceso simultáneamente a todas las informaciones polarimétricas de la muestra, incluyendo las diferencias de atenuación y retardos lineales y circulares. Esta caracterización completa de la matriz de Mueller presenta numerosas ventajas para el análisis de muestras biológicas particularmente. En efecto, incluso si en la mayor parte de los casos los tejidos presentan efectos intrínsecos esencialmente lineales, se puede observar simultáneamente, bajo incidencia rasante (lo que puede ser frecuente en endoscopia), una diferencia de atenuación significativa al atravesar la superficie del tejido, que puede dar lugar a una diferencia de atenuación circular si, por otra parte, el tejido presenta birrefringencia lineal.

### 35 Compendio

Según un primer aspecto, la presente descripción se refiere a un dispositivo de caracterización polarimétrica desplazada de una muestra que comprende:

- una fuente de emisión de al menos una onda luminosa incidente en al menos una primera longitud de onda;
- una fibra óptica mono-modo en la que la onda luminosa incidente está destinada a propagarse;
- 40 • un generador de estados de polarización dispuesto por el lado proximal de la fibra óptica y que permite la generación de un número dado de estados de polarización de la onda luminosa incidente, llamados estados de sonda;
- un reflector destinado a estar dispuesto por el lado distal de la fibra óptica;
- 45 • un analizador de estados de polarización dispuesto por el lado proximal de la fibra óptica y que permite, para cada estado de sonda de la onda incidente, el análisis de la polarización de la onda luminosa obtenida después de la propagación de la onda incidente en la fibra óptica, reflexión por el lado distal de la fibra óptica y propagación inversa en la fibra óptica;
- medios de tratamiento que permiten determinar:
  - 50 ○ a partir de una primera caracterización polarimétrica de la fibra óptica, obtenida por el análisis para cada estado de sonda, la polarización de al menos una onda reflejada por el lado distal de la fibra óptica por medio del reflector y propagada en sentido inverso en la fibra óptica, una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda;
  - a partir de una segunda caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra, obtenida por el análisis para cada estado de sonda de la polarización, una onda

reenviada del lado distal de la fibra óptica por la muestra y propagada en sentido inverso en la fibra óptica, una matriz de Mueller asociada con dicho conjunto en la primera longitud de onda;

- 5 ○ a partir de las matrices de Mueller asociadas respectivamente a la fibra óptica y al conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra, la matriz de Mueller asociada a la muestra en la primera longitud de onda.

La disposición original del dispositivo de caracterización polarimétrica permite tener acceso al conjunto de informaciones polarimétricas de una muestra gracias a una determinación completa de la matriz de Mueller de esta muestra.

- 10 Según uno o varios ejemplos de realización, la fuente de emisión permite la emisión de una onda en la primera longitud de onda y la emisión de una onda en una segunda longitud de onda distinta de la primera longitud de onda.

- 15 Según uno o varios ejemplos de realización, el reflector es ventajosamente un reflector espectral que permite la reflexión de una onda que se propaga a la fibra óptica en la segunda longitud de onda para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda y el paso de la onda en la primera longitud de onda para la caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra en la primera longitud de onda. Los medios de tratamiento permiten determinar:

- a partir de la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda, una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda;
- a partir de la matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda, una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda.

- 20 Esta primera variante basada sobre una separación cromática de las ondas luminosas permite una determinación simultánea de las matrices de Mueller de la fibra óptica por una parte y del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra. Por otra parte, no necesita elementos ópticos activos por el lado distal de la fibra óptica.

Según uno o varios ejemplos de realización, las dos longitudes de onda son distintas pero próximas; típicamente, la distancia entre las dos longitudes de onda no excede de 100 nm.

- 25 Según uno o varios ejemplos de realización, cuando el retardo de fase generado por la fibra óptica es superior a  $2\pi$ , la caracterización de la fibra óptica puede ser hecha por medio de dos longitudes de onda distintas.

- 30 Así, según este ejemplo, la fuente de emisión permite además la emisión de una onda en una tercera longitud de onda distinta de la primera y segunda longitudes de onda. El reflector espectral permite la reflexión de ondas que se propagan en la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda. Por otra parte, los medios de tratamiento permiten determinar:

- 35 ○ a partir de una caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda y a partir de una caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la tercera longitud de onda, respectivamente una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda y una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la tercera longitud de onda;
- a partir de las matrices de Mueller asociadas a la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda, la matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda.

De nuevo, las longitudes de onda son distintas, pero permanecen próximas, quedando la separación entre las longitudes de onda ventajosamente inferior a 100 nm.

- 40 Según uno o varios ejemplos de realización, el reflector es un reflector que se puede conmutar entre una posición reflectante y una posición pasante. Tal reflector permite, en la posición reflectante, la reflexión de una onda que se propaga en la fibra óptica en la primera longitud de onda para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica y, en la posición pasante, la reflexión de la onda por la muestra para la caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra.

- 45 Esta segunda variante presenta la ventaja de poder proceder a la caracterización de la fibra óptica directamente en la primera longitud de onda, es decir en la longitud de onda utilizada para caracterizar el conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra. Esto permite particularmente una mayor flexibilidad en la elección de la fibra óptica mono-modo utilizada.

- 50 Según uno o varios ejemplos de realización, y cualquiera que sea la variante de puesta en práctica, la fibra óptica mono-modo es una fibra óptica de mantenimiento de polarización, que elimina cualquier efecto quiral.

Según uno o varios ejemplos de realización, la fibra óptica mono-modo comprende un primer tramo de una fibra óptica mono-modo de mantenimiento de polarización y un segundo tramo de la misma fibra óptica mono-modo de

mantenimiento de polarización, siendo los tramos de la misma longitud y conectados entre ellos de tal manera que el eje rápido del primer tramo esté alineado con el eje lento del segundo tramo y viceversa.

Este ejemplo de fibra permite particularmente reducir el retardo de fase introducido por la fibra mientras que elimina cualquier efecto quiral facilitando así su caracterización.

- 5 Según uno o varios ejemplos de realización, el dispositivo según el primer aspecto comprende además por el lado distal de la fibra óptica, medios de focalización de una onda en la primera longitud de onda para la caracterización de una zona puntual de la muestra.

10 Según un ejemplo de realización, el dispositivo según el primer aspecto comprende además por el lado distal de la fibra óptica, medios de barrido para la caracterización polarimétrica de un conjunto de zonas puntuales de la muestra.

Según un segundo aspecto, la presente descripción se refiere a uno o varios métodos de caracterización polarimétrica desplazada de una muestra puestas en práctica por el o los dispositivos según el primer aspecto.

Así, la invención se refiere a un método de caracterización polarimétrica desplazada de una muestra que comprende:

- 15 - la emisión de una onda luminosa incidente en al menos una primera longitud de onda destinada a propagarse en una fibra óptica mono-modo;
- la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la primera longitud de onda, que comprende:
- 20     o la generación de un número dado de estados de polarización de la onda luminosa incidente, llamados estados de sonda, por medio de un generador de estados de polarización dispuesto por el lado proximal de la fibra óptica;
- 25     o el análisis por medio de un analizador de estados de polarización dispuesto por el lado proximal de la fibra óptica, para cada estado de sonda de la onda incidente, la polarización de la onda luminosa obtenida después de la propagación de la onda incidente en la fibra óptica, reflexión por medio de un reflector dispuesto del lado distal de la fibra óptica de la propagación inversa en la fibra óptica;
- 30     o la determinación de una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda;
- la caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra en la primera longitud de onda, comprendiendo:
- 35     o por medio de dicho generador de estados de polarización y del analizador de estados de polarización, el análisis para cada estado de sonda de la polarización, de una onda reenviada por el lado distal de la fibra por la muestra y propagada en sentido inverso en la fibra óptica;
- o la determinación de una matriz de Mueller asociada con dicho conjunto en la primera longitud de onda;
- 40     - la determinación de la matriz de Mueller asociada a la muestra en la primera longitud de onda partir de las matrices de Mueller asociadas respectivamente a la fibra óptica y al conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra.

Según uno o varios ejemplos de realización, el método comprende además la emisión de una onda luminosa en una segunda longitud de onda distinta de la primera longitud de onda. Según esta variante, el reflector es un reflector espectral que permite la reflexión de una onda que se propaga en la fibra óptica en la segunda longitud de onda para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda y el paso de la onda en la primera longitud de onda para la caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra en la primera longitud de onda. Por otra parte, la determinación de la matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda comprende:

- 45     o a partir de la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda, una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda;
- o a partir de la matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda, una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda.

50 Según uno o varios ejemplos de realización, el método comprende la emisión de una onda en una tercera longitud de onda distinta de la primera y segunda longitudes de onda, y el reflector espectral permite la reflexión de ondas que se propagan en la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda para la caracterización polarimétrica

de la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda; la determinación de la matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda comprende:

- 5                   ○ a partir de una caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda y a partir de una caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la tercera longitud de onda, respectivamente una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda y una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la tercera longitud de onda;
- a partir de las matrices de Mueller asociadas a la fibra óptica en la segunda longitud de onda y en la tercera longitud de onda, la matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda.

10   Según uno o varios ejemplos de realización, el reflector es un reflector que se puede conmutar entre una posición reflectante y una posición pasante, permitiendo, en la posición reflectante, la reflexión de una onda que se propaga en la fibra óptica en la primera longitud de onda para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica y, en la posición pasante, la reflexión de la onda por la muestra para la caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra.

15   Según uno o varios ejemplos de realización, el método según una de las variantes descritas precedentemente comprende además, por el lado distal de la fibra óptica, la focalización de una onda luminosa en la primera longitud de onda a los medios de focalización para la caracterización de una zona puntual de la muestra.

El método puede comprender igualmente, por el lado distal de la fibra óptica, el barrido por medios de barrido de la onda luminosa focalizada para la caracterización polarimétrica de un conjunto de zonas puntuales de la muestra.

20   **Breve descripción de los dibujos**

Otras ventajas y características aparecerán en la lectura de la descripción, ilustrada por las figuras siguientes:

Las figs. 1A y 1B, son una representación de la esfera de Poincaré y de un estado de polarización elíptica (ya descritos);

25   La fig. 1C, es una tabla que muestra los componentes de vectores de Stokes de diferentes estados de polarización (ya descrita);

La fig. 2, es un esquema que ilustra un montaje experimental para una caracterización por polarimetría de Mueller según la técnica anterior (ya descrita);

La fig. 3, es un esquema que ilustra un dispositivo de caracterización polarimétrica según la presente descripción, según un primer ejemplo;

30   La fig. 4, es un esquema que ilustra un dispositivo de caracterización polarimétrica según la presente descripción, según un segundo ejemplo;

La fig. 5, es un esquema que muestra según una vista parcial, una variante de un dispositivo de caracterización polarimétrica según la presente descripción;

35   La fig. 6, es un esquema que ilustra un montaje experimental utilizado para la validación experimental de un ejemplo del método de caracterización según la presente descripción;

Las figs. 7 y 8, son curvas experimentales obtenidas con el esquema mostrado en la fig. 6 y comparadas con valores teóricos esperados;

La fig. 9A, es un esquema parcial del esquema de la fig. 6, que representa una muestra utilizada para la validación de un ejemplo del método de caracterización según la presente descripción;

40   La fig. 9B, son curvas experimentales obtenidas con la muestra representada en la fig. 9A y comparadas con valores teóricos esperados;

La fig. 10A, es un esquema parcial del esquema de la fig. 6, que representa una muestra utilizada para la validación de un ejemplo del método de caracterización según la presente descripción;

45   La fig. 10B, son curvas experimentales obtenidas con una muestra del tipo representado en la fig. 10A y comparadas con valores teóricos esperados;

La fig. 11A, es un esquema parcial del esquema de la fig. 6, que representa otra muestra utilizada para la validación de un ejemplo del método de caracterización según la presente descripción;

La fig. 11B, son curvas experimentales obtenidas con una muestra del tipo representado en la fig. 11A y comparadas con valores teóricos esperados.

### Descripción detallada

La fig. 3 representa un dispositivo de caracterización polarimétrica 100 según un primer ejemplo, para la puesta en práctica de un método de caracterización polarimétrica según un primer aspecto de la presente descripción.

5 El dispositivo de caracterización polarimétrica 100 comprende de manera general una fuente de emisión 10 de al menos una onda luminosa en al menos una primera longitud de onda  $\lambda_E$  y una fibra óptica mono-modo 30 en la que la onda luminosa está destinada a propagarse para una caracterización desplazada de una muestra S. Una fibra óptica mono-modo presenta particularmente la ventaja con relación a una fibra multi-modo de no despolarizar la luz incidente incluso si puede ser llevada según su naturaleza y las condiciones experimentales a modificar la polarización. La muestra a analizar u «objeto de análisis» S está situada, con relación a la fuente de emisión 10, en la otra extremidad de la fibra óptica 30.

En la continuación de la descripción, se llamará parte proximal del dispositivo de caracterización polarimétrica cualquier parte del dispositivo situada por el lado de la fibra óptica donde se encuentra la fuente de emisión y parte distal del dispositivo cualquier parte del dispositivo situada en la otra extremidad de la fibra óptica, es decir donde se encuentra la muestra.

15 El dispositivo 100 comprende además un generador de estados de polarización PSG dispuesto por el lado proximal de la fibra óptica y que permite la generación de un número dado de estados de polarización de la onda luminosa (estados de polarización de sonda) y un analizador de estados de polarización PSA dispuesto por el lado proximal de la fibra óptica y que permite el análisis de los estados de polarización de la onda luminosa después de la reflexión por el lado distal de la fibra óptica y la propagación inversa en la fibra óptica.

20 En el ejemplo de la fig. 3, la fuente 10 permite la emisión de una onda en una primera longitud de onda  $\lambda_E$  y la emisión de al menos una onda en una segunda longitud de onda  $\lambda_{F1}$  distinta de la primera longitud de onda  $\lambda_E$ . Según una variante que será descrita en detalle a continuación, la fuente 10 permite la emisión de dos ondas respectivamente en las longitudes de onda  $\lambda_{F1}$  y  $\lambda_{F2}$  distintas entre ellas y distintas de  $\lambda_E$ . La fuente 10 comprende por ejemplo un conjunto de fuentes mono-cromáticas, por ejemplo, diodos láser, respectivamente representados por 12, 14, 16 en la fig. 3, emitiendo cada uno en una de las longitudes de onda distintas. Alternativamente, la fuente 10 puede estar constituida de una fuente única que emite en el conjunto de longitudes de onda, por ejemplo, una fuente de tipo "fuente súper continua" producida por expansión espectral de un haz láser en el sentido de una fibra óptica.

30 Ventajosamente, las fuentes de emisión son fuentes continuas. Alternativamente, se puede tratar de fuentes de impulsos de potencias máximas suficientemente débiles para no generar en la fibra óptica efectos ópticos no lineales. Otra opción consiste en utilizar una fuente continua modulada por un regulador de corriente y poner en práctica una detección síncrona sobre todos los detectores, con el fin de mejorar, eventualmente, la relación de señal a ruido comparada con una fuente continua. En este caso, la modulación es efectuada ventajosamente a una frecuencia muy superior a la frecuencia de conmutación de los cristales líquidos de los PSG y PSA, que es como máximo del orden del kHz, lo que no plantea un problema a priori, siendo la detección síncrona típicamente puesta en práctica hasta frecuencias de 100 kHz con sistemas comerciales.

35 El dispositivo de caracterización polarimétrica comprende además en el ejemplo descrito en la fig. 3 un reflector 40 selectivo en longitudes de onda, dispuesto por el lado distal de la fibra óptica, así como medios de focalización 42. El reflector 40 permite reflejar las ondas en la longitud de onda  $\lambda_{F1}$ , o en las longitudes de onda  $\lambda_{F1}$  y  $\lambda_{F2}$  mientras que deja pasar las ondas en la longitud de onda  $\lambda_E$ . El reflector 40 es por ejemplo un filtro espectral colocado en la salida de la fibra óptica 30; este filtro puede ser por ejemplo un filtro pasa altos que corta entre  $\lambda_{F2}$  y  $\lambda_E$ , si se elige  $\lambda_{F1} < \lambda_{F2} < \lambda_E$ . Este filtro puede también, por ejemplo, ser un filtro de paso de banda alrededor de  $\lambda_E$  si se elige  $\lambda_{F1} < \lambda_E < \lambda_{F2}$  o pasa bajos si se elige  $\lambda_E < \lambda_{F1} < \lambda_{F2}$ .

40 El dispositivo de caracterización polarimétrica 100 comprende por otra parte una lámina de separación 22 y elementos separadores de longitudes de onda 65, 63, por ejemplo, filtros espectrales, dispuestos después del analizador de estados de polarización PSA, y que permiten separar en función de la longitud de onda, las ondas retro-reflejadas o retro-transmitidas por el lado distal de la fibra y propagadas de vuelta a la fibra. Las ondas luminosas así separadas son enviadas hacia fotodetectores respectivamente representados como  $D_E$ ,  $D_{F1}$ ,  $D_{F2}$  en la fig. 3, por ejemplo, fotodiodos, sensibles respectivamente en las longitudes de onda  $\lambda_E$ ,  $\lambda_{F1}$  y  $\lambda_{F2}$ .

45 El dispositivo de caracterización polarimétrica 100 comprende igualmente medios de tratamiento 70 que permiten a partir de señales electrónicas emitidas por los foto-detectores determinar la matriz de Mueller de la muestra S, como se ha descrito a continuación. Los medios de tratamiento 70 aseguran particularmente el control y la sincronización de los PSG y PSA, la recogida y el tratamiento de las señales emitidas por los foto-detectores, la construcción de las matrices de Mueller.

50 El principio general del método de caracterización polarimétrica según la primera variante puesta en práctica por ejemplo por medio de un dispositivo tal como se ha descrito en la fig. 3 está basado en medidas simultáneas hechas en longitudes de onda diferentes pero próximas, típicamente separadas menos de 100 nm, para caracterizar la fibra óptica por una parte y el conjunto fibra-objeto por otra parte. Más precisamente, una o dos longitudes de onda pueden ser utilizadas para caracterizar la fibra ( $\lambda_{F1}$  y  $\lambda_{F2}$ ) y una es suficiente para el conjunto fibra-objeto de interés



( $\lambda_E$ ).

- Así, ondas luminosas, por ejemplo, ondas monocromáticas o casi monocromáticas (típicamente de anchuras espectrales inferiores a 40 nm) son enviadas en la fibra óptica mono-modo 30 por medio de una lente de inyección 24. Después de atravesar el reflector selectivo en longitudes de onda 40, el haz en la longitud de onda  $\lambda_E$  es focalizado sobre el objeto por medios de focalización 42, por ejemplo, una lente o cualquier otro elemento óptico capaz de realizar la función de focalización. Una parte de la luz reenviada por este objeto, siempre en  $\lambda_E$  vuelve a atravesar el elemento óptico de focalización 42 y el filtro espectral 40 para ser reinyectada en la fibra óptica 30. El o los haces en las longitudes de onda diferentes de  $\lambda_E$ , en este ejemplo las longitudes de onda  $\lambda_{F1}$  y  $\lambda_{F2}$ , son ellos mismos reflejados por el filtro espectral 40 y reinyectados en la fibra óptica 30 sin ser impactados por la muestra S. De vuelta, el conjunto de los haces en  $\lambda_{F1}$ ,  $\lambda_{F2}$  y  $\lambda_E$  son desviados en dirección del PSA, después separados a la salida del PSA por medio de los elementos separadores 65, 63 hacia los detectores 62, 64, 66. En el caso de la utilización de una fuente única de gran espectro que emite las longitudes de onda  $\lambda_E$ ,  $\lambda_{F1}$  y  $\lambda_{F2}$ , un filtro espectral de banda estrecha (típicamente < 40 nm) puede ser colocado ventajosamente delante de cada uno de los detectores 62, 64 y 66 para no dejar pasar más que una banda espectral estrecha alrededor de  $\lambda_E$ ,  $\lambda_{F1}$  y  $\lambda_{F2}$  respectivamente.
- Se describe en un primer tiempo un ejemplo de puesta en práctica del método según la presente descripción, en el que una segunda longitud de onda  $\lambda_{F1}$  es utilizada para caracterizar la fibra óptica mono-modo 30.

- Según este ejemplo, se procede a la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda  $\lambda_{F1}$ , después a la determinación de una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda  $\lambda_{F1}$ . Una matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_F$ ) asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda  $\lambda_E$  es deducida de la matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda  $\lambda_{F1}$ . Simultáneamente a la caracterización de la fibra óptica en la segunda longitud de onda  $\lambda_{F1}$ , una caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra es obtenida en la primera longitud de onda  $\lambda_E$  por el análisis de los estados de polarización de una onda retro-reflejada y/o retro-transmitida por la muestra. Una matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_T$ ) asociada a dicho conjunto en la primera longitud de onda  $\lambda_E$  es obtenida a partir de esta caracterización. Es entonces posible a partir de las matrices de Mueller asociadas respectivamente a la fibra óptica ( $\mathbf{M}_F$ ) y al conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra ( $\mathbf{M}_T$ ), determinar la matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_O$ ) asociada a la muestra en la longitud de onda  $\lambda_E$ .

- Se debe observar que la caracterización polarimétrica de la fibra óptica comprende de manera general la caracterización de la fibra óptica y del conjunto de los elementos comprendidos entre la extremidad de salida de la fibra óptica (extremidad distal) y el reflector 40. En ciertos casos, esta caracterización podrá ser asimilada a una caracterización de la fibra óptica sola, bien porque no hay otros elementos, o bien porque estos elementos no modifican la polarización. Por otra parte, los elementos ópticos que pueden encontrarse entre el reflector selectivo 40 y la muestra S son elegidos por naturaleza para no modificar la polarización de las ondas propagadas. Este es el caso por ejemplo de las lentes, u otros elementos ópticos tales como espejos selectivos de frecuencia, o más generalmente láminas constituidas de materiales ópticamente isótropos y que llevan eventualmente capas dieléctricas o metálicas, siendo utilizadas estas láminas a incidencias muy próximas de la normal (tolerancia típica del orden de 5°).

- La caracterización polarimétrica en una longitud de onda dada de un objeto a analizar, en este caso, la fibra óptica o el conjunto de fibra óptica/muestra es hecha de manera conocida y descrita por ejemplo en la patente europea EP 1411333. La onda luminosa es enviada de manera conocida sobre el generador de estados de polarización PSG, que puede ser por ejemplo controlado eléctricamente, con el fin de definir los 4 estados de polarización de sonda. Ventajosamente, estos estados de polarización son lo más independiente posibles. Son entonces repartidos sobre la esfera de Poincaré según un tetraedro regular. En la práctica, es posible trabajar con un mayor número de estados de polarización de sonda, pero se muestra que 4 estados de sonda son el número mínimo de estados de sonda para el análisis polarimétrico. Para generar los estados de polarización de sonda, el PSG comprende por ejemplo y de manera conocida un conjunto de elementos de los cuales un polarizador lineal, una primera célula de cristales líquidos controlable eléctricamente, una lámina de cuarto de onda y una segunda célula de cristales líquidos controlable eléctricamente. Los 4 vectores de Stokes correspondientes con los 4 estados de polarización así generados están dispuestos según 4 columnas para formar una matriz de modulación 4x4 representada como  $\mathbf{W}$ . Después de la interacción con la muestra, los estados de polarización reenviados son analizados por medio del analizador de estados de polarización PSA, que comprende elementos idénticos a los del PSG, pero dispuestos en el sentido inverso con relación a la dirección de la luz, de tal manera que, por ejemplo, la luz atraviesa en primer lugar la segunda célula de cristales líquidos, después la lámina de cuarto de onda, después la primera célula de cristales líquidos y el polarizador lineal. Los vectores de Stokes correspondientes con los 4 estados de polarización analizados por el PSA están dispuestos según 4 líneas para formar una matriz de análisis 4x4 representada como  $\mathbf{A}$ . Así, para cada uno de los 4 estados de polarización emitidos del PSG, se mide por medio de un detector la intensidad luminosa en la salida del PSA, según cada uno de los estados de polarización analizados. Se obtiene una matriz B de los 16 niveles de intensidad luminosa medidos tal como:

$$\mathbf{B}=\mathbf{A.M.W} \quad (4)$$

Donde  $\mathbf{M}$  es la matriz de Mueller de la muestra.

La inversión de las matrices conocidas **A** y **W** permite entonces determinar la matriz de Mueller según la fórmula:

$$\mathbf{M}=\mathbf{A}^{-1}.\mathbf{B}.\mathbf{W}^{-1} \quad (5)$$

5 Ventajosamente, una calibración puede ser operada para corregir imperfecciones y errores de alineación de los elementos que constituyen el PSG y el PSA. En efecto, las matrices de modulación y de análisis **W** y **A** pueden ser diferentes de los valores calculados teóricamente en función de los elementos que constituyen el generador y el analizador de los estados de polarización. Para practicar esta calibración, se puede por ejemplo colocar sucesivamente en el lugar de la muestra 4 muestras de calibración que permitirán obtener respectivamente 4 matrices de intensidades. A partir de algoritmos de calibración descritos en la literatura (véase por ejemplo la patente EP 1411333 citada anteriormente), se pueden obtener entonces las matrices de modulación y de análisis **W** y **A** reales.

10 En el ejemplo de caracterización polarimétrica de una muestra citada más arriba, el PSG y el PSA incluyen cristales líquidos (nemáticos o ferro-eléctricos). Muchos otros sistemas pueden ser utilizados para la puesta en práctica del método según la presente descripción. Por ejemplo, el PSG puede controlar la polarización por medio de células de Pockels (véase por ejemplo E. Compain y col. "Complete Mueller matrix measurement with a single high frequency modulation", Thin Solid Films 313-314, 47-52, 1998) o por medio de un modulador foto-elástico (véase por ejemplo E. Compain y col. "Complete high-frequency measurement of Mueller matrices based on a new coupled-phase modulator", Rev. Sci. Instrum, 68.2 2671-2680, 1997). Estos sistemas permiten codificar los cuatro estados del PSG simultáneamente sobre cuatro frecuencias diferentes. Por el lado del PSA, se puede considerar la utilización de sistemas divisores de amplitud, como el «DOAP» descrito por E. Compain y col. (Véase por ejemplo la patente US 6177995 B1) y que utiliza un prisma separador y cuatro sensores en paralelo. Este tipo de PSA puede ser ventajosamente acoplado a un PSG con codificación de frecuencia; la señal de cada uno de los sensores puede ser así desmodulada sobre las cuatro frecuencias del PSG, proporcionando el conjunto de señales desmoduladas así las 16 medidas a partir de las cuales se puede obtener la matriz de Mueller. Un ejemplo de este tipo de instrumento está descrito en la patente US 6175412 B1. Otros PSG y PSA utilizan polarizadores lineales fijos y retardadores giratorios (véase por ejemplo la patente US 7298480 B2).

La puesta en práctica del método de caracterización gracias al dispositivo mostrado en la fig. 3 permite medir en un primer momento una matriz de Mueller  $\mathbf{M}_{m1}(\lambda_{F1})$  de la fibra óptica en la segunda longitud de onda  $\lambda_{F1}$ , tal como:

$$\mathbf{M}_{m1}(\lambda_{F1}) = \mathbf{R}(-\theta_1).\mathbf{M}_F^R(\lambda_{F1}).\mathbf{M}_F(\lambda_{F1}).\mathbf{R}(\theta_1) \quad (3)$$

30 Donde  $\mathbf{M}_{F1}(\lambda_{F1})$  y  $\mathbf{M}_F^R(\lambda_{F1})$  son respectivamente las matrices de Mueller de la fibra óptica, a la ida y a la vuelta, y donde  $\mathbf{R}(\theta_1)$  y  $\mathbf{R}(-\theta_1)$  son respectivamente matrices de rotaciones de ángulos  $\theta_1$  y  $-\theta_1$ , siendo  $\theta_1$  el ángulo desconocido a priori entre los ejes neutros de la fibra a la entrada de ésta y la referencia de laboratorio en el que se definen los vectores de Stokes. En la hipótesis en la que la fibra se comporta como un desfaseador puro, el producto  $\mathbf{M}_F^R(\lambda_{F1}).\mathbf{M}_F(\lambda_{F1})$  corresponde a la matriz de un desfaseador lineal puro que representa esta fibra en una ida y vuelta. Los ángulos  $\theta_1$  y  $-\theta_1$  son por tanto determinados de manera que el producto  $\mathbf{R}(-\theta_1)^{-1}.\mathbf{M}_{m1}(\lambda_{F1}).\mathbf{R}(\theta_1)^{-1} = \mathbf{M}_F^R(\lambda_{F1}).\mathbf{M}_F(\lambda_{F1})$  corresponde a la matriz de tal desfaseador lineal puro. Alternativamente, estos ángulos pueden ser conocidos a partir de la posición en rotación de la fibra, cuyos ejes neutros habrán sido identificados previamente. Si la fibra no presenta efectos quirales (diferencia de atenuación y retardo circulares) lo que es el caso para una fibra mono-modo estándar si se tiene cuidado de no «retorcerla», las matrices  $\mathbf{M}_F^R(\lambda_{F1})$  y  $\mathbf{M}_F(\lambda_{F1})$  son las de dos retardadores lineales idénticos. Se deduce fácilmente del producto  $\mathbf{M}_F^R(\lambda_{F1}).\mathbf{M}_F(\lambda_{F1})$  medido directamente de cada una de las matrices  $\mathbf{M}_F(\lambda_{F1})$  y  $\mathbf{M}_F^R(\lambda_{F1})$  de la fibra, respectivamente a la ida y a la vuelta, en la primera longitud de onda  $\lambda_E$ . Ahora bien, la matriz de Mueller  $\mathbf{M}_T$  en la primera longitud de onda  $\lambda_E$  del conjunto de fibra óptica y muestra, que es por otra parte directamente medida, está dada por la ecuación:

$$\mathbf{M}_T(\lambda_E) = \mathbf{M}_F^R(\lambda_E).\mathbf{M}_O.\mathbf{M}_F(\lambda_E) \quad (4)$$

Donde  $\mathbf{M}_O$  es la matriz de Mueller buscada de la muestra en la longitud de onda  $\lambda_E$ .

45 En ciertos casos, podrá ser útil por otra parte determinar el ángulo  $\theta_2$  que define el azimut de uno de los ejes propios de la fibra a su salida, es decir en su extremidad distal, con relación a la referencia del laboratorio, con el fin de corregir la matriz  $\mathbf{M}_O$  precedentemente obtenida de eventuales efectos quirales. En el caso de fibras de mantenimiento de polarización, por ejemplo, éste azimut está unido a la fibra y puede ser determinado «mecánicamente».

50 Se puede deducir así por inversión de las matrices, la matriz de Mueller de la muestra:

$$\mathbf{M}_O = (\mathbf{M}_F^R(\lambda_E))^{-1}.\mathbf{M}_T(\lambda_E).(\mathbf{M}_F(\lambda_E))^{-1} \quad (5)$$

55 El método descrito más arriba podrá funcionar bien si las longitudes de onda  $\lambda_{F1}$  y  $\lambda_E$  son distintas, pero suficientemente próximas, es decir que presentan una diferencia inferior a 100 nm, ventajosamente inferior a 50 nm, y si la fibra se comporta bien como un retardador lineal con ejes neutros de direcciones bien identificadas, de tal manera que la fibra óptica induce un retardo de fase  $\delta\varphi_{F1}$  según los ejes neutros suficientemente pequeño (entre 0 y  $2\pi$ ). En este caso, es posible deducir de la matriz de la fibra óptica en la segunda longitud de onda  $\lambda_{F1}$ , la matriz de

la fibra óptica en la primera longitud de onda  $\lambda_E$  deduciendo el retardo de fase  $\delta\varphi_E$  en  $\lambda_E$  a partir del retardo de fase  $\delta\varphi_{F1}$  en  $\lambda_{F1}$  ( $\delta\varphi_E = \delta\varphi_{F1} * \lambda_{F1}/\lambda_E$ ).

5 Según una segunda variante del método de caracterización polarimétrica que puede ser igualmente puesto en práctica con un dispositivo tal como el que se ha representado en la fig. 3, dos longitudes de onda  $\lambda_{F1}$ ,  $\lambda_{F2}$  distintas entre ellas y distintas de la primera longitud de onda  $\lambda_E$  son utilizadas para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica.

10 Así según esta variante, la fuente de emisión permite además la emisión de una onda en una tercera longitud de onda  $\lambda_{F2}$  distinta de la primera y segunda longitudes de onda  $\lambda_E$  y  $\lambda_{F1}$ . El reflector selectivo 40, por ejemplo, un filtro espectral pasa altos, está adaptado para permitir la reflexión de las ondas que se propagan en la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda  $\lambda_{F1}$ ,  $\lambda_{F2}$  y deja pasar las ondas que se propagan en la primera longitud de onda  $\lambda_E$  si se elige  $\lambda_{F1} < \lambda_E < \lambda_{F2}$ .

15 Según esta variante, se efectúa una caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda  $\lambda_{F1}$  y  $\lambda_{F2}$ , por ejemplo, según los medios descritos precedentemente, con el fin de determinar una matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) y una matriz del Mueller asociada a la fibra óptica en la tercera longitud de onda ( $\lambda_{F2}$ ). La medida de la matriz de Mueller en la longitud de onda  $\lambda_{F1}$  permite determinar un retardo de fase  $\delta\varphi_{F1\_mes}$  igual al retardo de fase real  $\delta\varphi_{F1}$ , módulo  $2\pi$ . Dicho de otro modo, el retraso de fase buscado en  $\lambda_{F1}$  es  $\delta\varphi_{F1} = \delta\varphi_{F1\_mes} + 2m\pi$ , siendo m un número entero. Igualmente, la medida de la matriz de Mueller en la longitud de onda  $\lambda_{F2}$  permite determinar un retardo de fase  $\delta\varphi_{F2\_mes}$  igual al retardo de fase real  $\delta\varphi_{F2}$ , módulo  $2\pi$ . El retardo de fase buscado en  $\lambda_{F2}$  es  $\delta\varphi_{F2} = \delta\varphi_{F2\_mes} + 2m'\pi$ , siendo m' un número entero.

20 Estando próximas las dos longitudes de onda  $\lambda_{F1}$  y  $\lambda_{F2}$ , la relación  $\delta\varphi_{F1}/\delta\varphi_{F2}$  es, en primer orden, igual a la relación inversa de las longitudes de onda  $\lambda_{F2}/\lambda_{F1}$ . Asegurando que los desfases residuales  $\delta\varphi_{F1}$  y  $\delta\varphi_{F2}$  permanecen pequeños, lo que significa que los números enteros m y m' permanecen pequeños, típicamente inferior a 5, permitiendo la pareja (m, m') el respeto de la condición  $\delta\varphi_{F1}/\delta\varphi_{F2} = \lambda_{F2}/\lambda_{F1}$  puede ser fácilmente identificado, lo que permite deducir los valores de  $\delta\varphi_{F1}$  y  $\delta\varphi_{F2}$ . En un segundo momento, el retardo de fase  $\delta\varphi_E$  en  $\lambda_E$  es calculado por la regla de tres:  $\delta\varphi_E = \delta\varphi_{Fi} * \lambda_{Fi}/\lambda_E$  (i=1 o 2). Es así posible deducir las matrices de la fibra óptica de ida y vuelta en la longitud de onda  $\lambda_E$  y determinar la matriz buscada de la muestra, como se ha explicado precedentemente (ecuación 5).

30 En la práctica, la tecnología actual de las fibras mono-modo estándares muestra el inconveniente de presentar una orientación de los ejes neutros no suficientemente bien definida y que pueden variar en función de las sollicitaciones, de la temperatura, etc. Se puede preferir según una variante la utilización de fibras de mantenimiento de polarización cuya orientación de los ejes neutros a la entrada y salida es conocida y fijada. Sin embargo, resulta que el retardo de fase introducido por una fibra óptica de mantenimiento de polarización estándar es importante (típicamente  $\pi$  por mm), lo que puede resultar molesto para la puesta en práctica del método según las variantes descritas por medio de la fig. 3.

35 La solicitante ha desarrollado una fibra óptica mono-modo particularmente ventajosa para la puesta en práctica del método de caracterización polarimétrica según la presente descripción.

40 Esta fibra óptica, llamada en la siguiente descripción «fibra mono-modo de mantenimiento de polarización y de retardo compensado», comprende dos tramos de una misma fibra mono-modo de mantenimiento de polarización, de iguales longitudes, conectadas entre ellas (por una soldadura, por ejemplo), estando alineado el eje rápido del primer tramo con el eje lento del segundo tramo. Con esta disposición, la dirección de los ejes neutros de esta fibra, tanto a la entrada como a la salida, puede ser fácilmente determinada colocándola entre polarizadores cruzados y buscando la extinción del campo transmitido. En esta situación en efecto, la dirección del polarizador de entrada (respectivamente de salida) es la de uno de los ejes neutros de la fibra a la entrada (respectivamente a la salida). Así, si las longitudes de los tramos son rigurosamente iguales y si los dos tramos están condicionados de la misma manera (mismas curvaturas, misma temperatura...), se espera que el retardo de fase aportado por la fibra mono-modo de mantenimiento de polarización y de retardo compensado entre los dos componentes del campo inyectado sea nulo o insignificante, compensando el segundo tramo exactamente el primero. En realidad, una ligera diferencia de longitud entre las dos fibras y/o el acondicionamiento y/o un entorno diferentes para los dos tramos pueden inducir la existencia de un desfase residual, aportado por la fibra mono-modo de mantenimiento de polarización y de retardo compensado entre los dos componentes del campo a la salida de la fibra. La solicitante ha mostrado que este desfase residual podría ser inferior a  $8\pi$  cualquiera que sea la longitud de la fibra, incluso por debajo de  $4\pi$ . El método tal como se ha descrito precedentemente permitirá entonces por medida de la matriz de Mueller de la fibra óptica en una segunda longitud de onda  $\lambda_{F1}$ , incluso dos longitudes de onda  $\lambda_{F1}$ ,  $\lambda_{F2}$  como se ha descrito, determinar perfectamente la matriz de la fibra óptica en la primera longitud de onda  $\lambda_E$  y deducir de ello la matriz de Mueller de la muestra. Por otra parte, tal fibra presenta pocos defectos quirales.

La fig. 4 representa un dispositivo de caracterización polarimétrica 200 según un segundo ejemplo, para la puesta en práctica de un método de caracterización polarimétrica según la presente descripción.

El dispositivo 200 comprende un cierto número de elementos idénticos a los elementos del dispositivo 100 y que no son descritos de nuevo, de los cuales particularmente los PSG 20 y PSA 50, la fibra óptica mono-modo 30, los

medios de tratamiento 70.

Según esta variante, la fuente de emisión no comprende más que una fuente de emisión 12 que emite en la primera longitud de onda  $\lambda_E$ , por ejemplo, un diodo láser, y un detector a la salida del PSA sensible a esta misma longitud de onda, por ejemplo, un fotodiodo.

- 5 El reflector selectivo descrito en la fig. 3 es reemplazado por un reflector extraíble, por ejemplo, un reflector que se puede conmutar, por ejemplo, de tipo MEMS, que puede funcionar en un modo ON cuando es posicionado a la salida de la fibra y OFF cuando es separado de la extremidad de la fibra, como se ha ilustrado en la fig. 4.

10 Según esta variante, es posible efectuar alternativamente una caracterización de la fibra óptica directamente en la longitud de onda de interés  $\lambda_E$ , después una caracterización del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra igualmente a esta misma longitud de onda. Si las caracterizaciones de la fibra y del conjunto fibra/muestra son hechas en un tiempo suficientemente corto (típicamente inferior a 10 ms), es posible poner en práctica el método con una simple fibra óptica mono-modo o una fibra óptica mono-modo de mantenimiento de polarización estándar. Por supuesto, este método puede igualmente ser puesto en práctica con la fibra óptica mono-modo de mantenimiento de polarización y retardo compensado tal como se ha descrito precedentemente.

- 15 La matriz de Mueller de la muestra puede entonces ser determinada a partir de las matrices de Mueller de la fibra y del conjunto que comprende la fibra y la muestra, como se ha explicado precedentemente (ecuación 5).

La fig. 5 muestra una variante aplicable a uno u otro de los ejemplos de los dispositivos descritos por medio de las figs. 3 y 4.

20 Según esta variante, un sistema de barrido 46 está dispuesto por el lado proximal, a continuación de los medios de focalización 42. En otra disposición, el sistema de barrido 46 puede ser colocado entre la fibra 30 y los medios de focalización 42. En este caso, puede ser ventajosamente precedido de medios de colimación del haz que sale de la fibra 30. El sistema de barrido permite escanear la muestra con el fin de reconstruir una imagen de una región de interés.

25 La solicitante ha mostrado igualmente que sería posible gracias a un micro barrido sobre un conjunto de puntos vecinos de la muestra deshacerse de los artefactos que podrían resultar de una medida puntual. En particular, la matriz de Mueller medida en el punto de focalización del haz sobre un objeto puede hacer aparecer un índice de despolarización inferior al índice de despolarización que sería obtenido analizando una región más grande. El índice de despolarización producido por tal región más grande puede ser obtenido a partir de la media de una serie de matrices de Mueller medidas puntualmente en diversos lugares de esta región.

- 30 Las figs. 7 a 11 muestran los primeros resultados experimentales obtenidos con el método según la presente descripción.

35 Estos primeros resultados son obtenidos con un dispositivo del tipo del de la fig. 4 y sobre muestras « de ensayo » bien calibradas. La fig. 6 muestra el montaje experimental puesto en práctica para estas validaciones. El conjunto de los elementos utilizados son idénticos a los representados en la fig. 4 pero la muestra S está formada aquí de un objeto de análisis 48 calibrado y un espejo plano 49.

40 En el caso de los resultados mostrados en la fig. 7, la muestra está formada de una lámina de onda de tipo lámina  $\lambda/8$  seguida de un espejo. La lámina  $\lambda/8$  introduce un retardo de fase de  $45^\circ$  entre sus ejes neutros cuando es atravesada en un simple paso por la luz. Esta lámina es girada en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la luz de manera que hace variar la orientación de sus ejes neutros con relación a la referencia del laboratorio. La curva C1 muestra la orientación dada a la lámina con relación a una orientación de referencia arbitraria, comprendida entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  (línea continua), y la orientación medida por el dispositivo (puntos). La curva C2 muestra, para cada una de estas orientaciones, el retardo de fase medido para esta lámina. Este retardo, igual a  $90^\circ$ , corresponde con el retardo de fase acumulado durante el doble trayecto de la lámina  $\lambda/8$  (ida y vuelta) analizada.

45 En el caso de los resultados mostrados en la fig. 8, la muestra está constituida de un compensador de Babinet-Soleil seguido de un espejo. El compensador de Babinet-Soleil introduce un retardo de fase conocido y ajustable entre sus ejes neutros cuando es atravesado por la luz. La curva C3 muestra el retardo de fase lineal introducido sobre una ida y vuelta de la luz ajustada por regulación del compensador de Babinet-Soleil (línea continua) y el retardo de fase medido correspondiente (puntos).

50 La fig. 9A ilustra una muestra constituida de una primera lámina con caras paralelas 48 seguida de un espejo 49. Las caras de la lámina son perpendiculares al plano de incidencia del haz luminoso procedente del sistema de colimación 24 y su normal es inclinada un ángulo  $\alpha$  ajustable con relación a la dirección del haz. Esta lámina se comporta por tanto como un componente de diferencia de atenuación lineal puro cuya diferencia de atenuación es regulable por medio del ángulo  $\alpha$ . La fig. 9B muestra la diferencia de atenuación lineal de la lámina con caras paralelas sobre una ida y vuelta de la luz (líneas continuas) calculada en función del ángulo  $\alpha$  y la diferencia de atenuación lineal medida correspondiente (puntos). Se muestra por otra parte que, para cada uno de estos puntos,

55

la diferencia de atenuación circular y el retardo de fase lineal medidos son nulos.

La fig. 10A representa una muestra constituida por un compensador de Babinet-Soleil 47, seguido de una lámina con caras paralelas 48 y un espejo 49. La lámina con caras paralelas está colocada con relación al haz incidente como en el caso de la fig. 9A. En esta disposición, la normal a la lámina está inclinada con relación al haz incidente de un ángulo  $\alpha$  tal que introduce una diferencia de atenuación lineal del 35% sobre una ida y vuelta de la luz. En lo que se refiere al compensador de Babinet-Soleil, su eje rápido está orientado, en el plano perpendicular al haz, de manera que forma un ángulo de  $45^\circ$  con relación al eje de rotación de la lámina. Con esta disposición, la lámina permanece fija, el retardo de fase introducido por el compensador de Babinet es ajustado entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  para un trayecto simple, es decir entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  sobre una ida y vuelta de la luz.

Las simulaciones numéricas muestran que, cuando el compensador de Babinet-Soleil es regulado para introducir un retardo de fase  $\gamma$  comprendido entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  durante un trayecto simple, el conjunto compensador + lámina con caras paralelas se comporta como un componente que introduce un retardo de fase  $2\gamma$  sobre una ida y vuelta y una combinación de diferencias de atenuación lineales  $D_L$  y circulares  $D_C$  tales que la diferencia de atenuación resultante

$D = \sqrt{D_L^2 + D_C^2} = 35\%$ . Cuando  $\gamma=0^\circ$ , la diferencia de atenuación es una diferencia de atenuación lineal pura  $D = D_L = 35\%$  y cuando  $\gamma=90^\circ$ , la diferencia de atenuación es una diferencia de atenuación circular pura  $D = D_C = 35\%$ . Las curvas C5, C6 y C7 de la fig. 10B muestran en líneas continuas los resultados de las simulaciones calculando respectivamente el retardo de fase, la diferencia de atenuación circular y la diferencia de atenuación lineal en la disposición de la fig. 10A. Los puntos asociados con las curvas C5, C6 y C7 muestran los resultados de las medidas experimentales correspondientes.

La fig. 11A representa una muestra idéntica a la de la fig. 10A, pero en la que el orden de los componentes está invertido. Dicho de otro modo, la muestra está constituida de una lámina con caras paralelas 48 seguida de un compensador de Babinet-Soleil 47 y de un espejo 49, siendo todas las otras regulaciones idénticas a las de la fig. 10A.

Las simulaciones numéricas muestran que, cuando el compensador de Babinet-Soleil es regulado para introducir un retardo de fase  $\gamma$  comprendido entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  durante un trayecto simple, el conjunto compensador + lámina con caras paralelas se comporta como un componente que introduce un retardo de fase  $2\gamma$  sobre una ida y vuelta y una combinación de diferencias de atenuación lineal  $D_L$  y circular  $D_C$  tales que la diferencia de atenuación lineal decrece del 35% al 0% cuando el retardo de fase  $\gamma$  evoluciona de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , y la diferencia de atenuación circular crece de 0% hasta un 17,5% luego decrece hasta el 0% cuando el retardo de fase  $\gamma$  evoluciona de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Las curvas C8, C9 y C10 de la fig. 11B muestran en líneas continuas los resultados de las simulaciones calculando respectivamente el retardo de fase, la diferencia de atenuación circular y la diferencia de atenuación lineal en la disposición de la fig. 11A. Los puntos asociados con las curvas C8, C9 y C10 muestran los resultados de las medidas experimentales correspondientes.

Los resultados experimentales así presentados muestran la viabilidad del método de caracterización polarimétrica según la presente descripción y las posibilidades de acceder a informaciones polarimétricas que se refieren a muestras completas y de manera precisa, particularmente los retardos de fase lineal y las diferencias de atenuación lineal y circular.

El método así descrito podrá ser puesto en práctica no solamente para la caracterización polarimétrica de las muestras biológicas en endoscopia sino también para la caracterización de muestras de difícil acceso, como por ejemplo la caracterización de materiales aislantes o conductores en entornos hostiles (presencia de radiaciones nucleares, campos electromagnéticos fuertes, temperaturas muy elevadas o muy bajas, etc.).

Aunque se ha descrito a través de un cierto número de ejemplos de realización detallados, el procedimiento y el dispositivo de caracterización polarimétrica según la invención comprende diferentes variantes, modificaciones y perfeccionamientos que aparecerán de manera evidente al experto en la técnica, quedando entendido que estas diferentes variantes, modificaciones y perfeccionamientos son parte del alcance de la invención, tal como se ha definido por las reivindicaciones siguientes.

**REIVINDICACIONES**

1.- Dispositivo de caracterización polarimétrica desplazada (100, 200) de una muestra (S) que comprende:

- una fuente de emisión (10) de al menos una onda luminosa incidente al menos en una primera longitud de onda ( $\lambda_E$ );
- 5 - una fibra óptica mono-modo (30) en la que la onda luminosa incidente está destinada a propagarse;
- un generador de estados de polarización (20) dispuesto por el lado proximal de la fibra óptica que permite la generación de un número dado de estados de polarización de la onda luminosa incidente, llamados estados de onda;
- un reflector (40, 44) destinado a estar dispuesto por el lado distal de la fibra óptica;
- 10 - un analizador de estados de polarización (50) dispuesto por el lado proximal de la fibra óptica que permite, para cada estado de la sonda de la onda incidente, el análisis de la polarización de la onda luminosa obtenido después de la propagación de la onda incidente en la fibra óptica (30), la reflexión del lado distal de la fibra óptica y propagación inversa en la fibra óptica (30);
- medios de tratamiento (70) que permiten determinar:
  - 15 ○ a partir de una primera caracterización polarimétrica de la fibra óptica, obtenida por el análisis para cada estado de la sonda, la polarización de al menos una onda reflejada por el lado distal de la fibra óptica por medio del reflector y propagada en sentido inverso en la fibra óptica (30), una matriz de Mueller ( $M_F(\lambda_E)$ ) asociada a la fibra óptica con la primera longitud de onda;
  - 20 ○ a partir de una segunda caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra, obtenida por el análisis para cada estado de sonda de la polarización, de una onda reenviada por el lado distal de la fibra por la muestra y propagada en el sentido inverso en la fibra óptica (30), una matriz de Mueller ( $M_T$ ) asociada a dicho conjunto en la primera longitud de onda;
  - 25 ○ a partir de las matrices de Mueller asociadas respectivamente a la fibra óptica y al conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra, la matriz de Mueller ( $M_O$ ) asociada a la muestra en la primera longitud de onda.

2.- Un dispositivo de caracterización polarimétrica según la reivindicación 1, en el que:

- la fuente de emisión permite la emisión de una onda en la primera longitud de onda ( $\lambda_E$ ) y la emisión de una onda en una segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) distinta de la primera longitud de onda,
- 30 - el reflector es un reflector espectral que permite la reflexión de una onda que se propaga en la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) y el paso de la onda en la primera longitud de onda ( $\lambda_E$ ) para la caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica en la muestra en la primera longitud de onda ( $\lambda_E$ );
- los medios de tratamiento permiten determinar:
  - 35 ○ a partir de la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ), una matriz de Mueller ( $M_F(\lambda_{F1})$ ) asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ );
  - a partir de la matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ), una matriz de Mueller ( $M_F(\lambda_E)$ ) asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda ( $\lambda_E$ ).

3.- Un dispositivo de caracterización polarimétrica según la reivindicación 2, en el que:

- 40 - la fuente de emisión permite además la emisión de una onda en una tercera longitud de onda ( $\lambda_{F2}$ ) distinta de la primera y de la segunda longitudes de onda,
- el reflector espectral permite la reflexión de ondas que se propagan en la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda ( $\lambda_{F1}$ ,  $\lambda_{F2}$ ) para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda ( $\lambda_{F1}$ ,  $\lambda_{F2}$ );
- los medios de tratamiento permiten determinar:
  - 45 ○ a partir de una caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) y a partir de una caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la tercera longitud de onda ( $\lambda_{F2}$ ), respectivamente una matriz de Mueller ( $M_F(\lambda_{F1})$ ) asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) y una matriz de Mueller ( $M_F(\lambda_{F2})$ ) asociada a la fibra óptica en la tercera longitud de onda ( $\lambda_{F2}$ );

- a partir de las matrices de Mueller asociadas a la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) y en la tercera longitud de onda ( $\lambda_{F2}$ ), la matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_F(\lambda_E)$ ) asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda ( $\lambda_E$ ).
- 5 4.- Un dispositivo de caracterización polarimétrica según la reivindicación 1, en el que el reflector es un reflector que se puede conmutar entre una posición reflectante y una posición pasante, permitiendo, en la posición reflectante, la reflexión de una onda que se propaga en la fibra óptica en la primera longitud de onda para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica y, en la posición pasante, la reflexión de la onda por la muestra para la caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra.
- 10 5.- Un dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la fibra óptica mono-modo (30) es una fibra óptica de mantenimiento de polarización.
- 6.- Un dispositivo según la reivindicación 5, en el que la fibra óptica mono-modo comprende un primer tramo de una fibra óptica mono-modo de mantenimiento de polarización y un segundo tramo de la misma fibra óptica mono-modo de mantenimiento de polarización, siendo los tramos de la misma longitud y conectados entre ellos de tal manera que el eje rápido del primer tramo sea alineado con el eje lento del segundo tramo y viceversa.
- 15 7.- Un dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además por el lado distal de la fibra óptica, medios de focalización (42) de una onda en la primera longitud de onda para la caracterización de una zona puntual de la muestra.
- 8.- Un dispositivo según la reivindicación 7, que comprende además por el lado distal de la fibra óptica, medios de barrido (46) para la caracterización polarimétrica de un conjunto de zonas puntuales de la muestra.
- 20 9.- Un método de caracterización polarimétrica desplazada de una muestra (S) que comprende:
  - la emisión de una onda luminosa incidente en al menos una primera longitud de onda ( $\lambda_E$ ) destinada a propagarse en una fibra óptica mono-modo (30);
  - la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la primera longitud de onda, que comprende:
    - 25 ○ la generación de un número dado de estados de polarización de la onda luminosa incidente, llamados estados de sonda, por medio de un generador de estados de polarización (20) dispuesto por el lado proximal de la fibra óptica;
    - el análisis, por medio de un analizador de estados de polarización (50) dispuesto por el lado proximal de la fibra óptica, para cada estado de sonda de la onda incidente, de la polarización de la onda luminosa obtenida después de la propagación de la onda incidente en la fibra óptica (30), la reflexión por medio de un reflector (40, 44) dispuesto por el lado distal de la fibra óptica y la propagación inversa en la fibra óptica (30);
    - 30 ○ la determinación de una matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_F(\lambda_E)$ ) asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda;
  - la caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra en la primera longitud de onda, que comprende:
    - 35 ○ por medio de dicho generador de estados de polarización (20) y analizador de estados de polarización (50) el análisis para cada estado de sonda de la polarización, de una onda reenviada por el lado distal de la fibra por la muestra y propagada en sentido inverso en la fibra óptica (30);
    - 40 ○ la determinación de una matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_T$ ) asociada a dicho conjunto en la primera longitud de onda;
  - la determinación de la matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_O$ ) asociada a la muestra en la primera longitud de onda partir de las matrices de Mueller asociada respectivamente a la fibra óptica y al conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra.
- 10.- Un método de caracterización polarimétrica según la reivindicación 9, que comprende:
  - 45 - la emisión de una onda luminosa en una segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) distinta de la primera longitud de onda ( $\lambda_E$ ), y en la que:
  - el reflector es un reflector espectral que permite la reflexión de una onda que se propaga en la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) y el paso de la onda en la primera longitud de onda ( $\lambda_E$ ) para la caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica y la muestra en la primera longitud de onda ( $\lambda_E$ );
  - 50

- la determinación de la matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_F(\lambda_E)$ ) asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda comprende:

- o a partir de la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ), una matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_F(\lambda_{F1})$ ) asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ );
- 5 o a partir de la matriz de Mueller asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) una matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_F(\lambda_E)$ ) asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda ( $\lambda_E$ ).

11.- Un método de caracterización polarimétrica según la reivindicación 10, que comprende:

- la emisión de una onda en una tercera longitud de onda ( $\lambda_{F2}$ ) distinta de la primera y de la segunda longitudes de onda,

10 y en la que:

- el reflector espectral permite la reflexión de ondas que se propagan en la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda ( $\lambda_{F1}$ ,  $\lambda_{F2}$ ) para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda y tercera longitudes de onda ( $\lambda_{F1}$ ,  $\lambda_{F2}$ );

15 - la determinación de la matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_F(\lambda_E)$ ) asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda comprende:

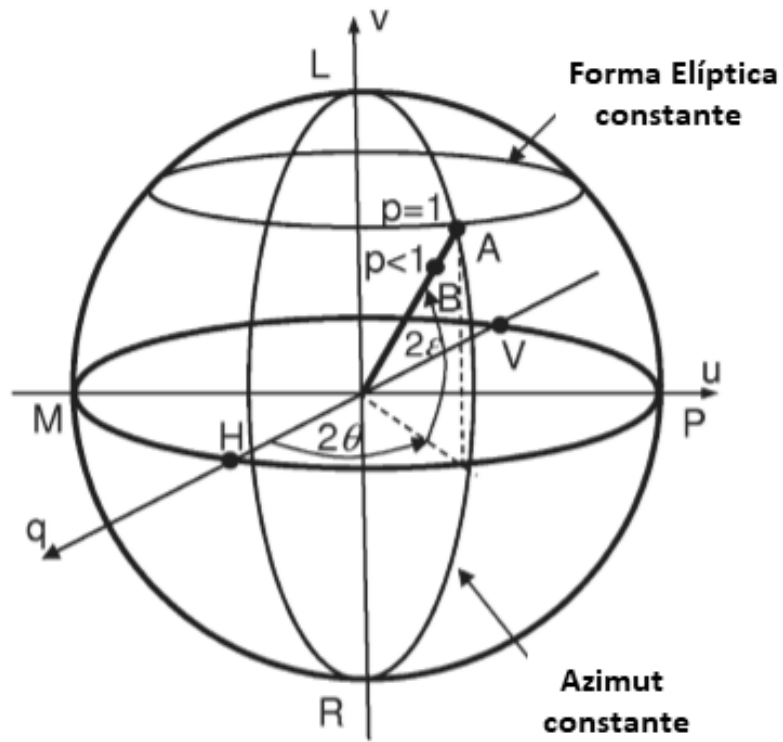
- o a partir de una caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) y a partir de una caracterización polarimétrica de la fibra óptica en la tercera longitud de onda ( $\lambda_{F2}$ ), respectivamente una matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_F(\lambda_{F1})$ ) asociada a la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) y una matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_F(\lambda_{F2})$ ) asociada a la fibra óptica en la tercera longitud de onda ( $\lambda_{F2}$ );
- 20 o a partir de las matrices de Mueller asociadas a la fibra óptica en la segunda longitud de onda ( $\lambda_{F1}$ ) y en la tercera longitud de onda ( $\lambda_{F2}$ ), la matriz de Mueller ( $\mathbf{M}_F(\lambda_E)$ ) asociada a la fibra óptica en la primera longitud de onda ( $\lambda_E$ ).

25 12.- Un método de caracterización polarimétrica según la reivindicación 9, en el que el reflector es un reflector que se puede conmutar entre una posición reflectante y una posición pasante, que permite, en la posición reflectante, la reflexión de una onda que se propaga en la fibra óptica en la primera longitud de onda para la caracterización polarimétrica de la fibra óptica y, en la posición pasante, la reflexión de la onda por la muestra para la caracterización polarimétrica del conjunto que comprende la fibra óptica de la muestra.

30 13.- Un método según una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, que comprende además por el lado distal de la fibra óptica, la focalización de una onda luminosa en la primera longitud de onda en los medios de focalización (42) para la caracterización de una zona puntual de la muestra.

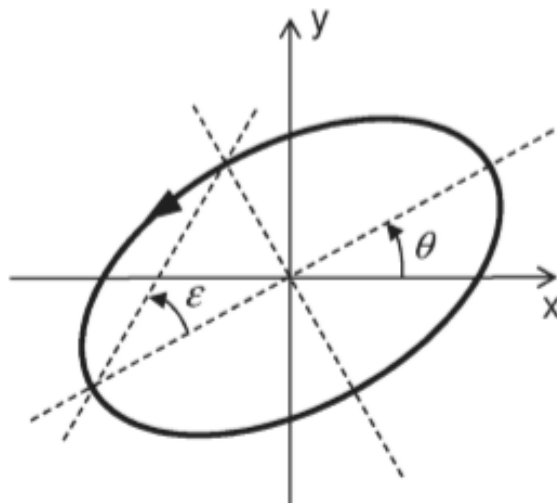
35 14.- Un método según la reivindicación 13, que comprende además por el lado distal de la fibra óptica, el barrido por medios de barrido (46) de la onda luminosa focalizada para la caracterización polarimétrica de un conjunto de zonas puntuales de la muestra.





TÉCNICA ANTERIOR

FIG.1A



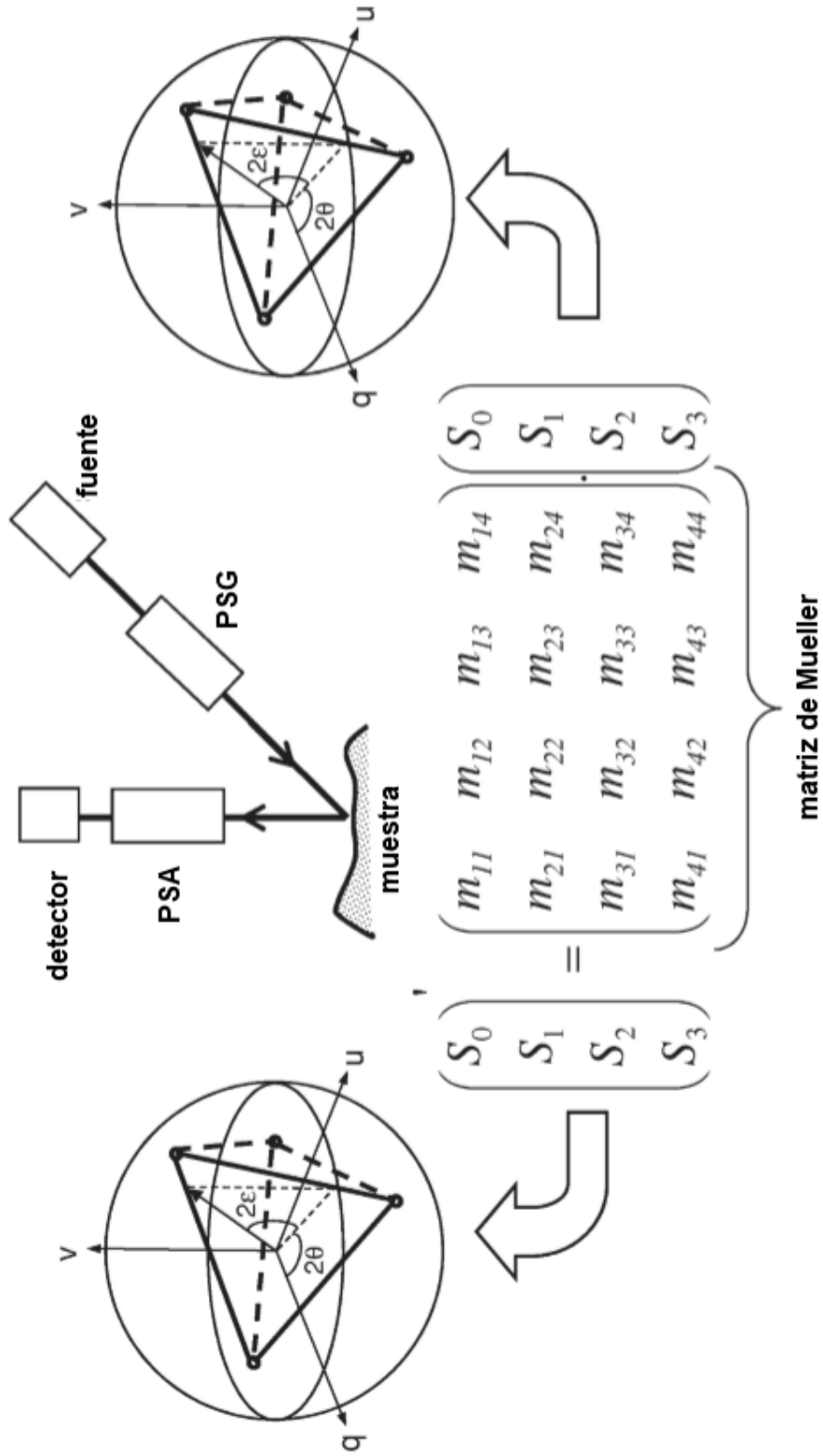
TÉCNICA ANTERIOR

FIG.1B

H	V	P	M	L	R	A
$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\theta \cos 2\epsilon \\ \sin 2\theta \cos 2\epsilon \\ \sin 2\epsilon \end{bmatrix}$

TÉCNICA ANTERIOR

FIG.1C



TECNICA ANTERIOR

FIG.2

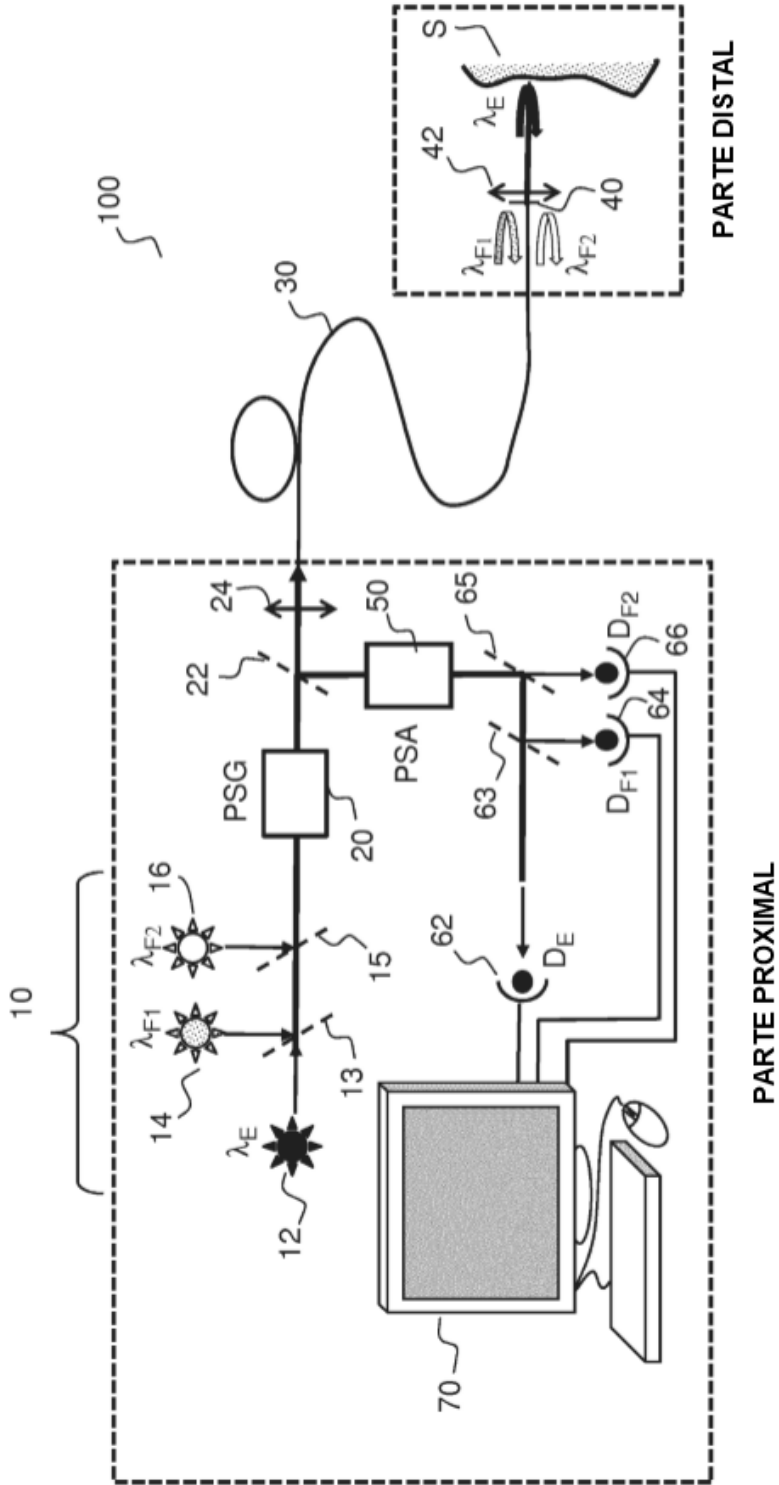


FIG.3

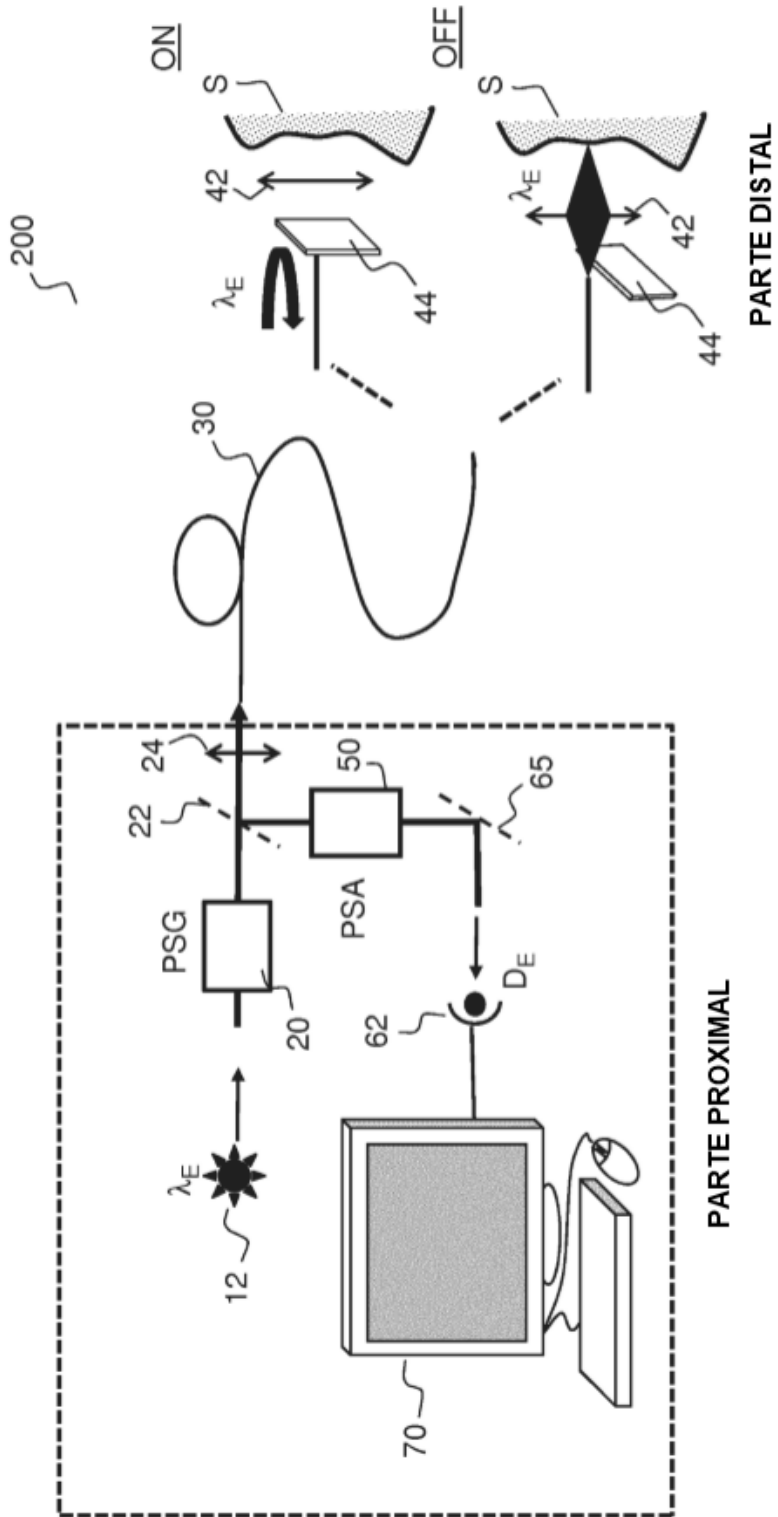
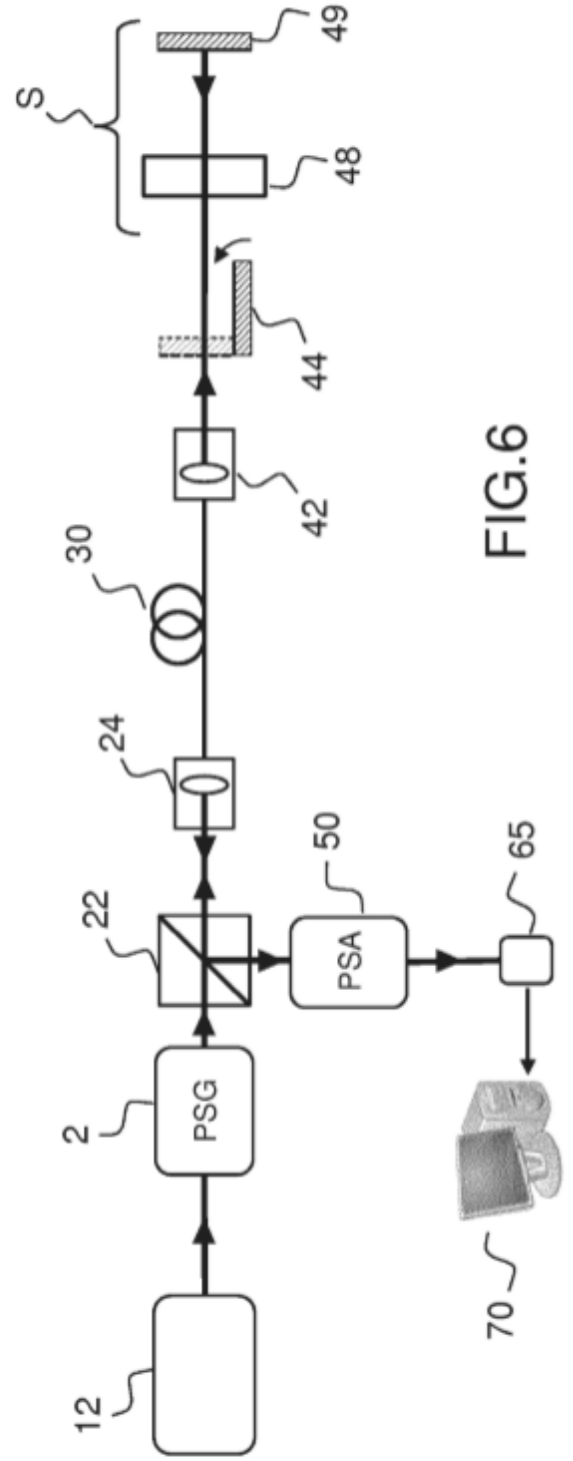
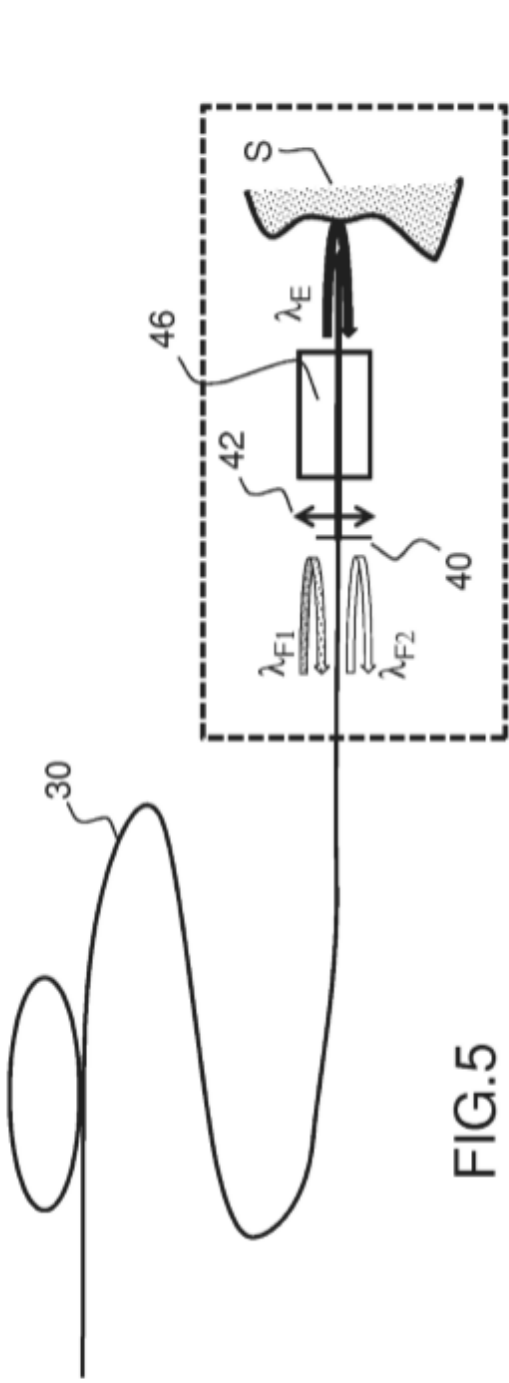


FIG.4



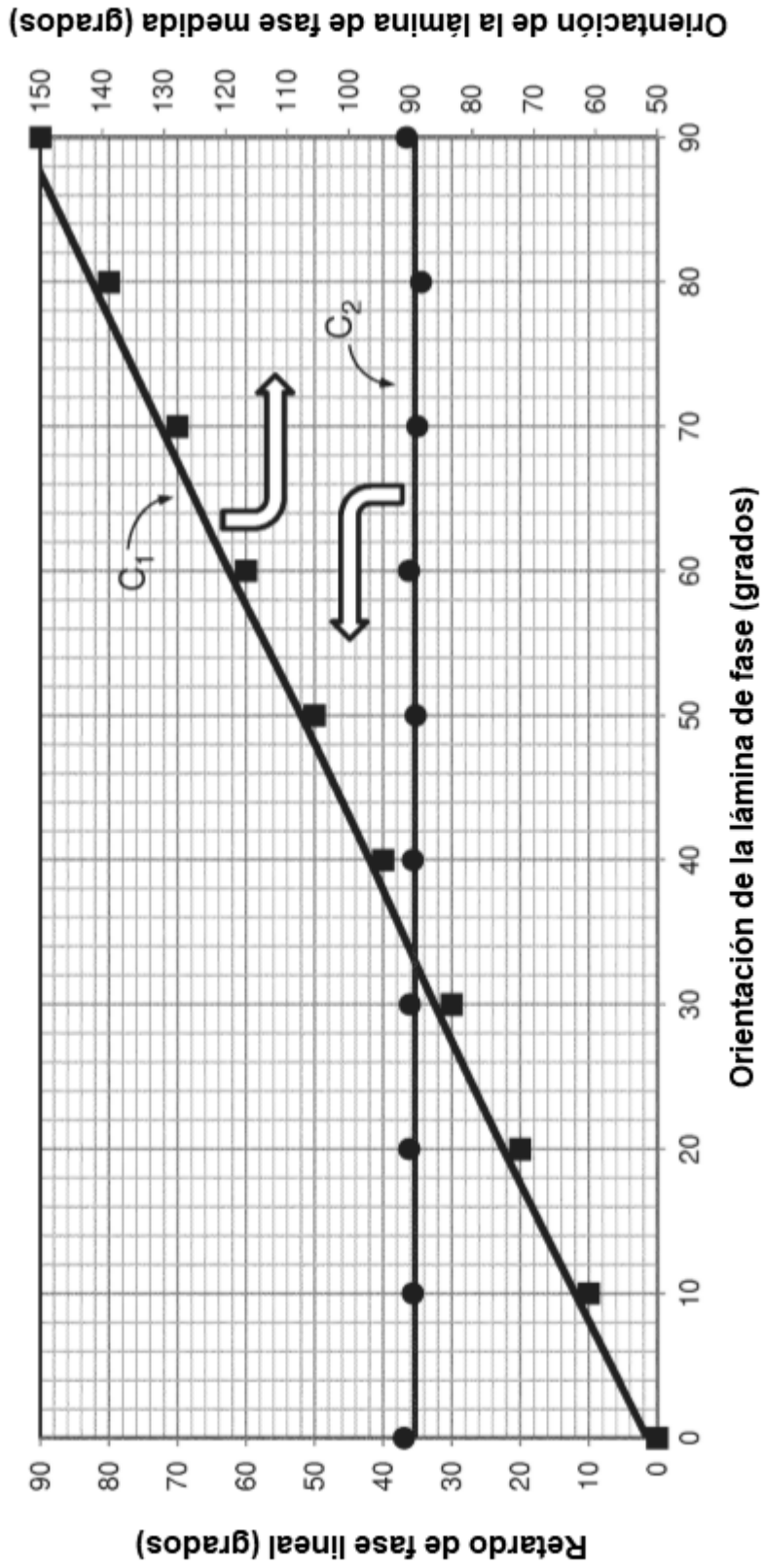


FIG.7

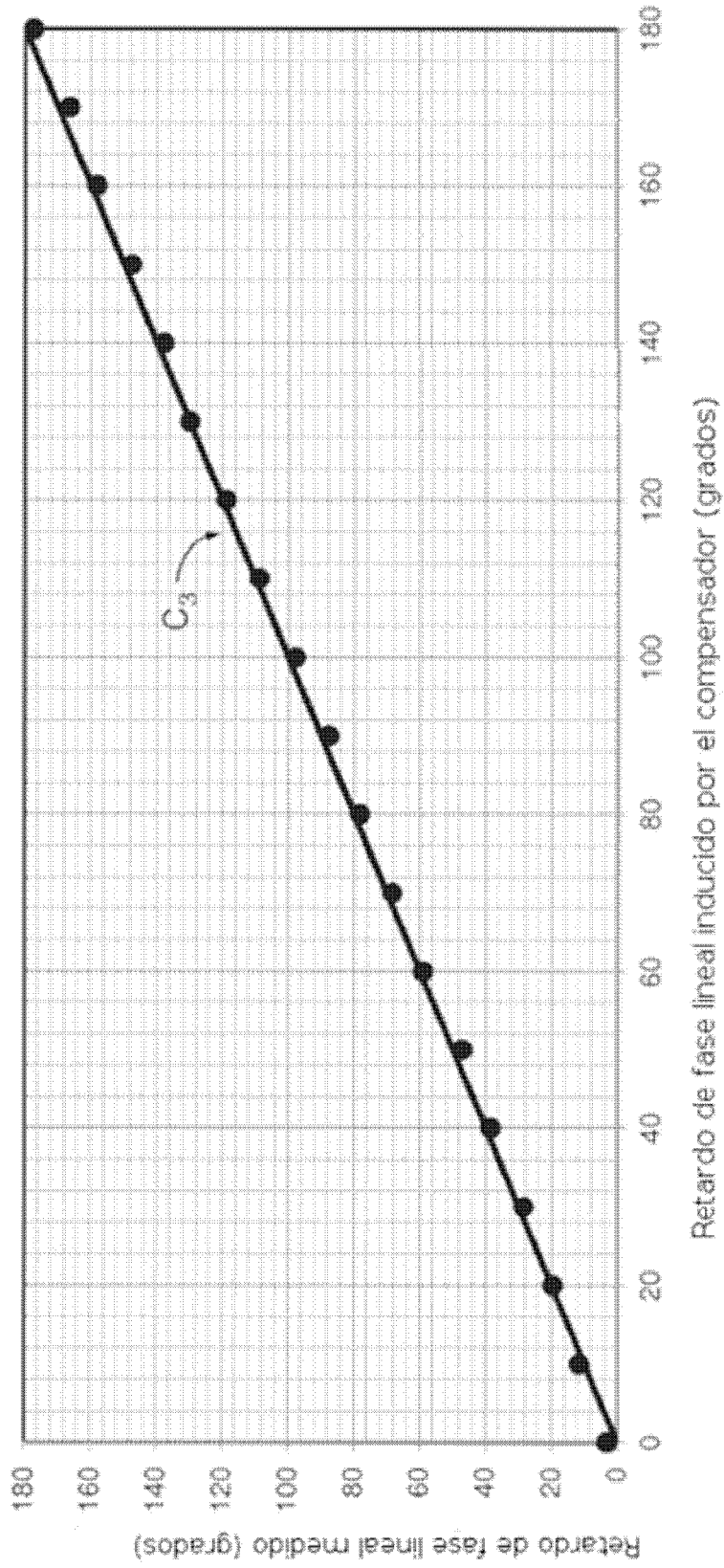
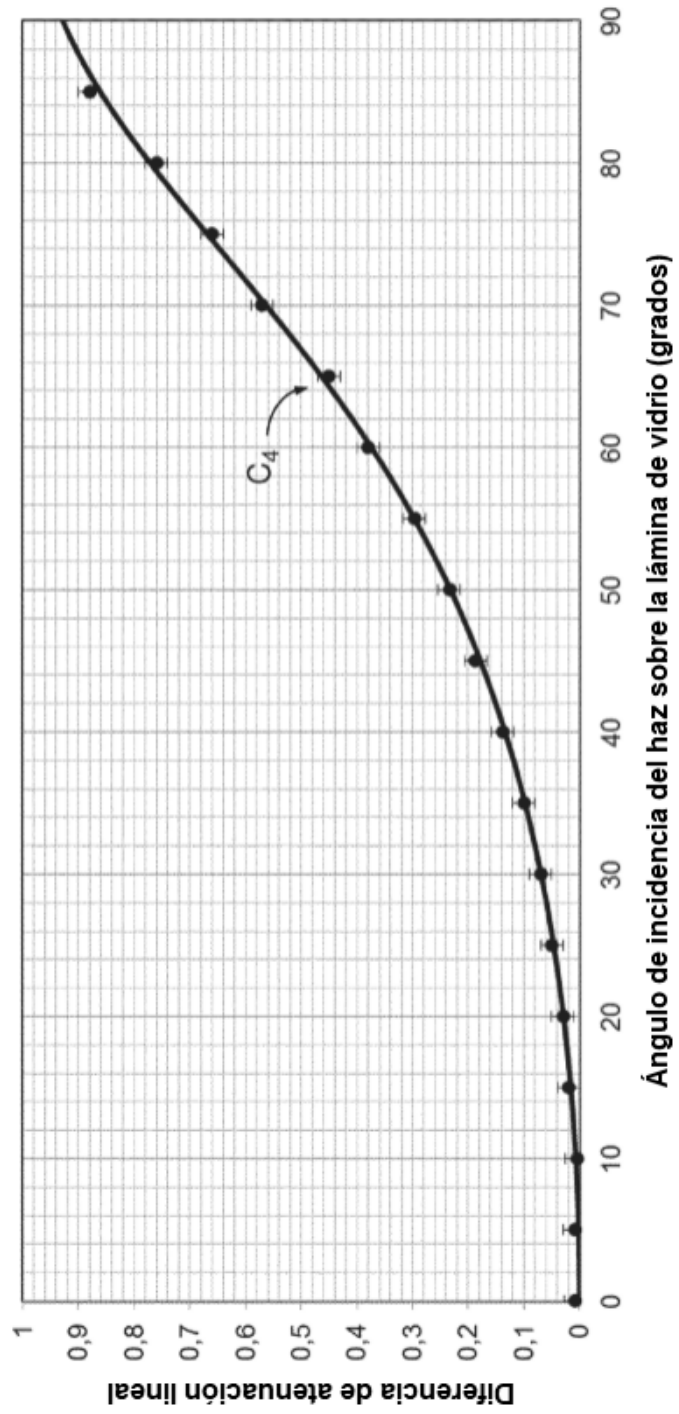
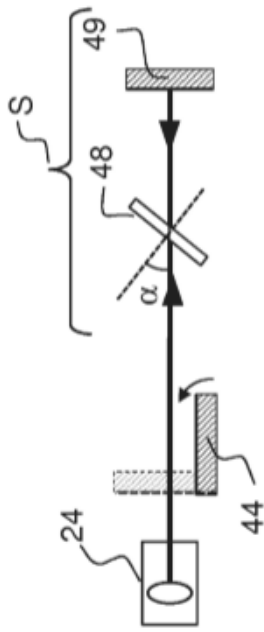
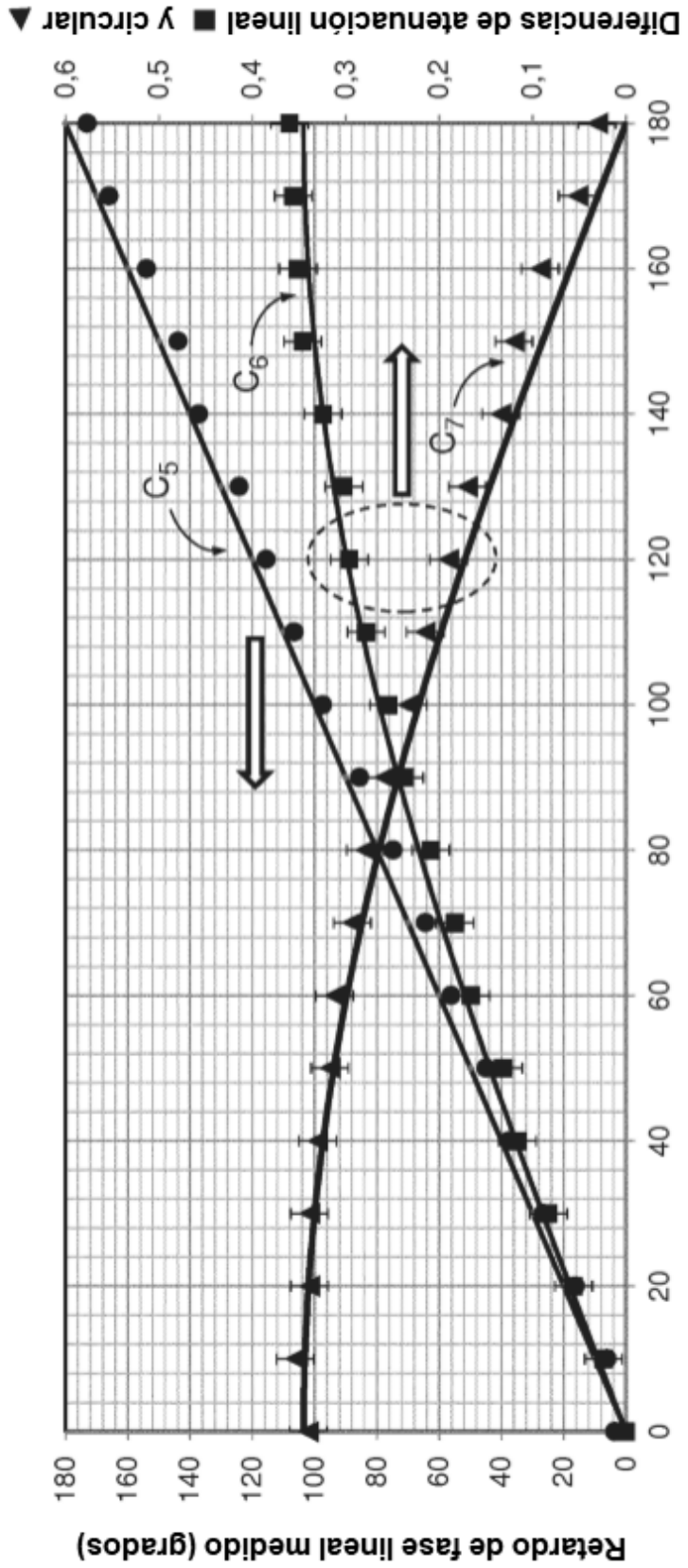
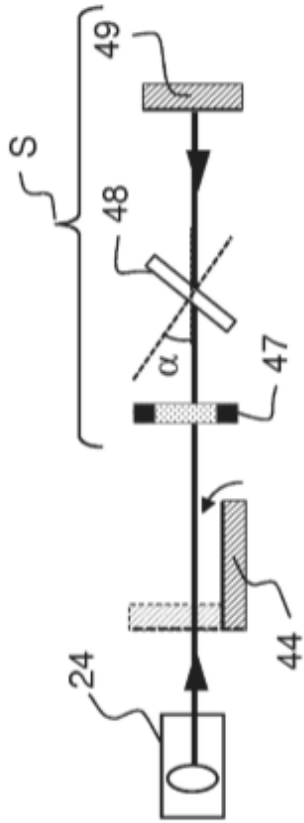
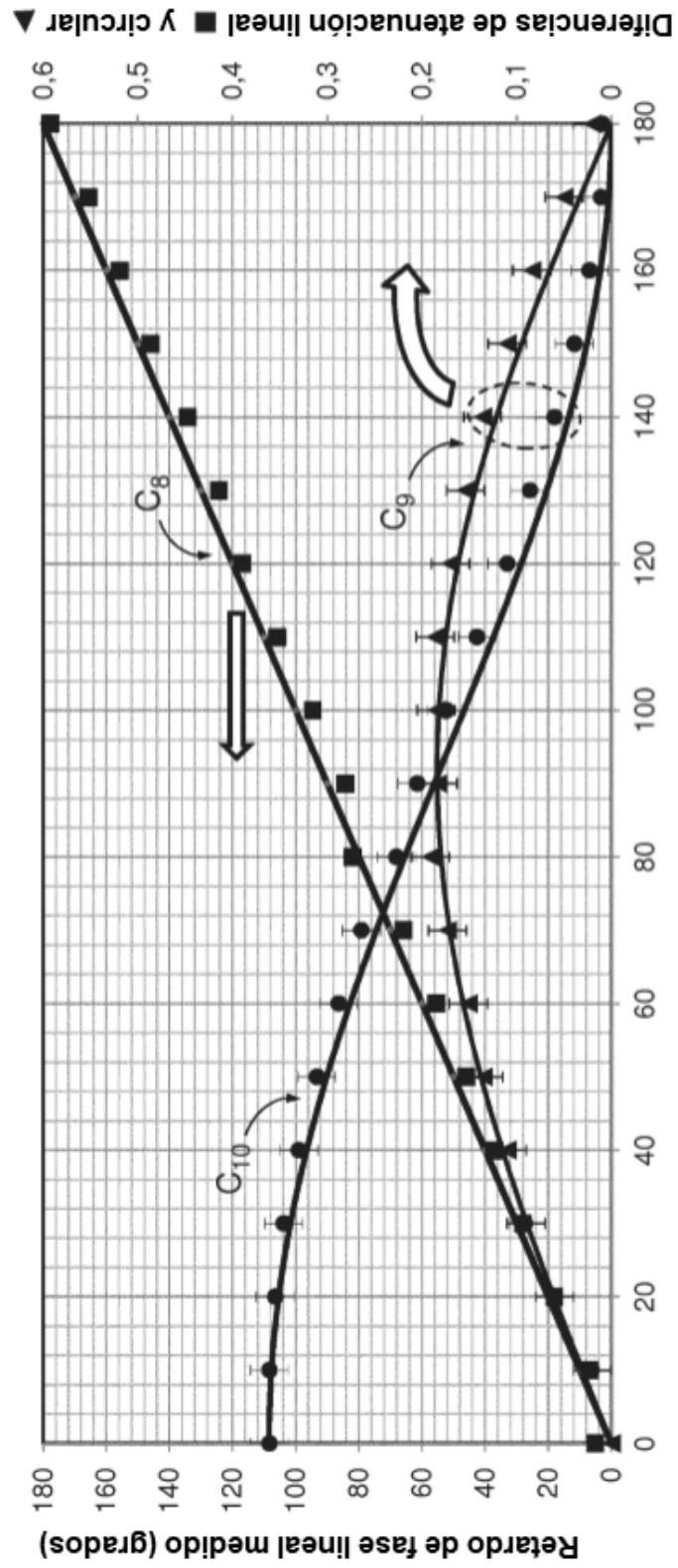
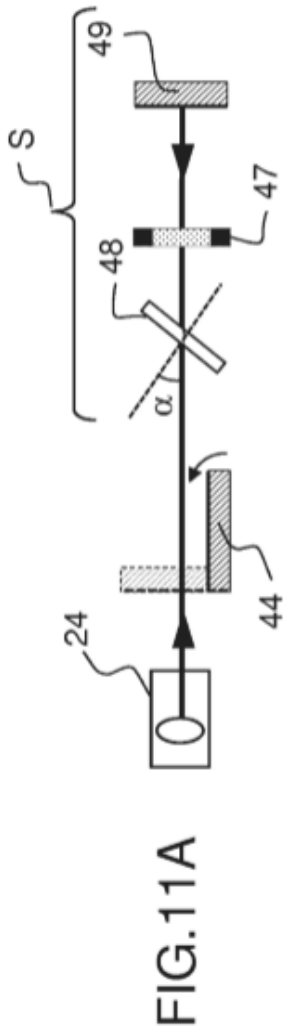


FIG.8









Retardo de fase lineal inducido por el compensador (grados)

FIG.11B