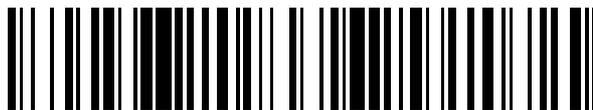


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 566 684**

21 Número de solicitud: 201630162

51 Int. Cl.:

G01J 4/04 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN PREVIO

B2

22 Fecha de presentación:

11.02.2016

43 Fecha de publicación de la solicitud:

14.04.2016

Fecha de la concesión:

19.09.2016

45 Fecha de publicación de la concesión:

26.09.2016

73 Titular/es:

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
(100.0%)**

**Ctro. Apoyo a la Innovación, la Investigación y la
Transferencia de Tecnología, CTT, Edif. 6G,
Camino de Vera s/n
46022 Valencia (Valencia) ES**

72 Inventor/es:

**ESPINOSA SORIA, Alba;
GRIOL BARRES, Amadeu y
MARTÍNEZ ABIETAR, Alejandro José**

74 Agente/Representante:

MALDONADO JORDAN, Julia

54 Título: **Dispositivo y método para medir el estado de polarización de un haz incidente**

57 Resumen:

La invención describe un dispositivo para medir el estado de polarización de un haz que comprende dos guías de onda perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación del haz, intersectándose en una zona de intersección cuyo centro representa un origen de coordenadas sobre el que incide el haz; dos medios que recubren por arriba y por abajo dichas guías siendo sus índices de refracción a la longitud de onda del haz menores que el de las guías; un difusor en la zona de intersección de las guías y descentrado con respecto al origen de coordenadas en magnitudes diferentes con respecto a cada uno de los ejes longitudinales de las guías; y un sensor de potencia en cada uno de los cuatro puertos de salida de las guías. También se describe un método correspondiente.

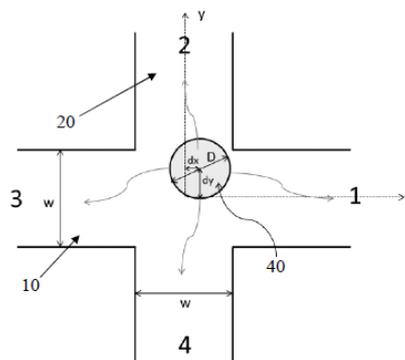


FIG. 1

ES 2 566 684 B2

DESCRIPCIÓNDISPOSITIVO Y MÉTODO PARA MEDIR EL ESTADO DE POLARIZACIÓN
DE UN HAZ INCIDENTE

5

Campo de la invención

La presente invención se refiere al campo de las ondas electromagnéticas, y más concretamente a la medición del estado de polarización de ondas electromagnéticas, por ejemplo, de un haz de luz.

10

Antecedentes de la invención

La polarización es una propiedad fundamental de las ondas electromagnéticas, incluyendo la luz. Una onda electromagnética consiste en un campo eléctrico y otro magnético perpendiculares entre sí que oscilan en un plano perpendicular (llamado plano de polarización) a la dirección de propagación de dicha onda. La polarización de dicha onda se refiere a la oscilación del vector campo eléctrico en el plano perpendicular a la dirección de propagación. La proyección de la parte real del vector campo eléctrico sobre el plano de polarización describe en general una elipse con un sentido de rotación asociado (que puede ser a izquierdas o a derechas) que se denomina elipse de polarización. Dicha elipse define la polarización de una onda electromagnética. Si la relación entre los ejes de la elipse es la unidad, la polarización es circular. Si dicha relación es infinito, entonces la polarización es lineal. En general, puede considerarse que el plano de polarización es el plano xy mientras que la onda se propaga en paralelo al eje z.

20

25

30

En numerosas aplicaciones (química, astronomía, comunicaciones ópticas) es absolutamente necesario conocer

el estado de polarización (EDP) de una onda electromagnética. Para ello, una forma habitual de representación paramétrica que no requiere ninguna descripción gráfica (como el caso de la elipse de polarización) es el uso del vector de Stokes \vec{S} , compuesto por cuatro elementos, que se obtiene a partir de seis parámetros definidos en unidades de unidad de potencia (W/m²) según la ecuación (1) a continuación:

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_H + I_V \\ I_H - I_V \\ I_{45} + I_{135} \\ I_R - I_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde I_H , I_V , I_{45} , I_{135} , I_R e I_L corresponden, respectivamente, a la densidad de potencia de la onda electromagnética incidente medida por polarizadores ideales para polarización lineal horizontal, polarización lineal vertical, polarización lineal oblicua a 45°, polarización lineal oblicua a 135°, polarización circular a derechas y polarización circular a izquierdas.

Para medir el EDP de una onda electromagnética monocromática se utiliza habitualmente un conjunto de Q analizadores de polarización cuya respuesta es una cierta potencia óptica P_q ($q = 1, \dots, Q$), que puede expresarse mediante un vector \vec{P} . Dicha respuesta puede caracterizarse mediante un vector de cuatro componentes, $\vec{A} = [a_{q,1}, a_{q,2}, a_{q,3}, a_{q,4}]$ definidos por las siguientes ecuaciones (2) a (5):

$$a_{q,1} = b_{q,H} + b_{q,V} \quad (2)$$

$$a_{q,2} = b_{q,H} - b_{q,V} \quad (3)$$

$$a_{q,3} = b_{q,45} - b_{q,135} \quad (4)$$

$$a_{q,4} = b_{q,R} - b_{q,L} \quad (5)$$

donde los coeficientes $b_{q,i}$ se definen como el cociente entre la potencia medida por el analizador q -ésimo P_q cuando se incide con una polarización ideal i (i puede ser H, V, 45, 135, R y L, siguiendo la nomenclatura de la definición de los parámetros de Stokes) y la densidad de potencia de la onda incidente.

La respuesta total del sistema de analizadores es la matriz de medida polarimétrica \vec{W} , que es una matriz $4 \times Q$ que contiene en su fila q -ésima el vector \vec{A} correspondiente a la respuesta del analizador q -ésimo. La matriz \vec{W} se expresa mediante la siguiente ecuación (6):

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} \vec{A}_1 \\ \dots \\ \vec{A}_q \\ \dots \\ \vec{A}_Q \end{bmatrix} \quad (6)$$

Así se obtiene la siguiente relación matricial, definida por la ecuación (7):

$$\vec{P} = \vec{W} \cdot \vec{S} \quad (7)$$

donde \vec{S} es el vector de Stokes de una señal de entrada cualquiera. Si $Q=4$ y las salidas de cada analizador son linealmente independientes, entonces \vec{W} es invertible, y el vector de Stokes de la señal incidente, que proporciona la información completa sobre el EDP, se obtiene según la siguiente ecuación (8):

$$\vec{S} = \vec{W}^{-1}\vec{P} \quad (8)$$

Un dispositivo que cumple los requisitos anteriores y que permite determinar completamente los cuatro parámetros de Stokes de una onda incidente, y por tanto su EDP, se
 5 denomina polarímetro de Stokes.

Para el caso concreto de medida del EDP de luz que se propaga en espacio libre se usan generalmente como analizadores de polarización una combinación de platos de cuarto de onda y polarizadores lineales, pudiéndose rotar
 10 algunos de ellos mecánicamente. Además, pueden estar dispuestos en serie (cada analizador mide la polarización de la señal a la salida del analizador anterior) o en paralelo (se usa un divisor para obtener cuatro haces de luz a partir del haz de luz inicial y se usan distintos
 15 analizadores, linealmente independientes, para cada haz). Como ejemplo de este último caso se puede mencionar el documento US 3572938. Dichos componentes, tanto platos de cuarto de onda como polarizadores lineales, son voluminosos (tamaño de varios órdenes de magnitud mayor a la longitud
 20 de onda que se quiere medir) y caros de fabricar. Además, si hay que rotar los platos mecánicamente para obtener medidas en distintos instantes temporales (por ejemplo, normalmente se rota el plato en cuatro posiciones angulares distintas, luego la luz pasa por un polarizador lineal fijo
 25 y se mide la potencia a la salida), no es posible medir el EDP en tiempo real.

Para medir el EDP de luz que se propaga en fibra óptica se usan componentes similares a los anteriormente mencionados, pero integrados en fibra. Por ejemplo, en la
 30 patente US 6211957 se describe un polarímetro en fibra que usa, además de un plato de cuarto de onda inscrito en la fibra, una red de difracción para muestrear la potencia de

la luz guiada. Este tipo de polarímetros se denomina en línea ya que sólo se extrae una porción de la onda guiada para medir su EDP y el resto continúa viajando por la fibra, por lo que es muy útil en redes de comunicaciones
5 ópticas. No obstante, también en este caso se trata de componentes con un tamaño superior al de la longitud de onda, que no pueden integrarse ni extenderse a otros rangos de longitud de onda. Además, su coste es muy elevado.

Para conseguir la miniaturización de un polarímetro
10 (en principio se podría pensar en reducir su tamaño incluso por debajo de la longitud de onda de la luz de la que se quiere medir su EDP) y, en consecuencia, una reducción en su coste, recientemente han surgido diferentes trabajos de investigación proponiendo nuevas aproximaciones basadas en
15 la respuesta óptica de metales estructurados en la micro y nanoescala. Podemos clasificar estos trabajos en polarizadores basados en resonadores plasmónicos y polarizadores basados en metasuperficies.

A la primera clase pertenecen los siguientes trabajos:
20 F. Afshinmanesh, J. S. White, W. Cai, M.L. Brongersma ("Measurement of the polarization state of light using an integrated plasmonic polarimeter". Nanophotonics 1, 125-129 (2012)) e Y. B. Xie, Z.-Y. Liu, Q.-J. Wang, Y.-Y. Zhu, X.-J Zhan, X.-J. ("Miniature polarization analyzer based on
25 surface plasmon polaritons". Appl. Phys. Lett. 105, 101017 (2014)), que demuestran la medición completa de EDP usando nanoestructuras metálicas que actúan como analizadores de polarización en paralelo linealmente independientes. En estos artículos se obtienen todos los parámetros de Stokes
30 de la onda electromagnética incidente usando una estructura de medida con un tamaño muy reducido, por debajo de las 10 μm^2 , pero las estructuras empleadas presentan muchos inconvenientes: para fabricarlas hay que perforar el metal

con resolución nanométrica, lo que no permite su producción a bajo coste; producen muchas pérdidas en la señal que miden, por lo que no se pueden usar como polarímetros en línea; no son de banda ancha, ya que la respuesta se produce en un pequeño margen espectral; el concepto no es exportable a otros regímenes de frecuencia de la señal electromagnética. A la segunda pertenecen los siguientes artículos:

D. Wen *et al.* ("Metasurface for characterization of the polarization state of light". *Opt. Express* 23, 10272-10281 (2015)) demuestran la medición del EDP no completa usando una metasuperficie formada por nanoestructuras metálicas. Este trabajo es mejorado en A. Pors *et al.*, ("Plasmonic metagratings for simultaneous determination of Stokes parameters," *Optica* 2, 716-723 (2015)) donde el uso de tres metasuperficies puestas en proximidad sí que permiten extraer la EDP completa a partir de mediciones de intensidad de haces difractados en direcciones diferentes a la normal (eje z) no contenidas en el plano de polarización xy, y cuya dirección de propagación variaría según la longitud de onda. Para medir la intensidad de dichos haces de forma sencilla sería más práctico que los haces se propagasen sobre el plano de polarización, donde se ha creado la metasuperficie, de forma que sea sencillo una interconexión a fibras ópticas externas (para realizar la medida de intensidad). Esta es la novedad introducida en el artículo J. P. Balthasar Mueller, Kristjan Leosson, and Federico Capasso, "Ultracompact metasurface in-line polarimeter," *Optica* 3, 42-47 (2016) donde la metasuperficie diseñada y situada en el plano xy permite generar cuatro haces de luz propagándose en distintas direcciones sobre un medio dieléctrico situado en dicho plano, siendo la potencia de cada uno de estos cuatro haces

proporcional a estados de polarización elípticos de la onda incidente. Tras ello, la potencia de cada haz se extrae usando redes de difracción y es medida externamente, lo que permite recomponer el EDP. En todos los polarímetros
5 basados en metasuperficies el tamaño de la región de medida (donde incide la luz que se quiere medir) y que definiría el tamaño mínimo del polarímetro en el plano xy es del orden de decenas de μm^2 . Además todos ellos emplean metales nanoestructurados, lo que dificulta la fabricación (sobre
10 todo a gran escala) e introduce pérdidas de absorción que reducirían las prestaciones del medidor de EDP.

Por tanto, sigue existiendo en la técnica la necesidad de dispositivos y métodos que permitan medir el estado de polarización de un haz de radiación electromagnética que
15 superen las desventajas de la técnica anterior. En concreto, sería deseable disponer de un dispositivo de este tipo que reduzca los costes de producción, por ejemplo, evitando la inclusión de metales nanoestructurados. En ese sentido, sería muy adecuado que el dispositivo pudiese ser
20 fabricado completamente usando tecnología microelectrónica de silicio, que permite la fabricación a gran escala y bajo coste (por dispositivo). También sería deseable disponer de un dispositivo de este tipo cuyo tamaño sea reducido con respecto a los de la técnica anterior, ya que la
25 nanofotónica está permitiendo obtener dispositivos con tamaños incluso por debajo de la longitud de onda de la radiación incidente, lo cual ayudaría adicionalmente a reducir sus costes de producción (posibilidad de fabricar más chips en una misma oblea). También sería deseable
30 disponer de un dispositivo que permita medir el estado de polarización de un haz de radiación electromagnética de manera sencilla, rápida, en tiempo real y tanto de haces que se propagan en espacio libre como de haces que se

propagan por fibra.

Sumario de la invención

En un primer aspecto la presente invención da a
 5 conocer un dispositivo para medir el estado de polarización
 de un haz incidente de radiación electromagnética. El
 dispositivo comprende:

- 10 - dos guías de onda situadas sobre un mismo plano,
 perpendiculares entre sí y perpendiculares a la
 dirección de propagación del haz incidente,
 formadas por materiales dieléctricos o
 semiconductores que se intersecan en una zona de
 intersección cuyo centro representa un origen de
 coordenadas sobre el que incide el haz incidente;
- 15 - dos medios, también dieléctricos o semiconductores,
 que recubren por arriba y por abajo dichas guías de
 onda de tal manera que sus índices de refracción a
 la longitud de onda del haz incidente son menores
 que el índice de refracción de las guías de onda;
- 20 - un difusor del haz incidente, estando el difusor
 situado en la zona de intersección de las guías de
 onda y descentrado con respecto al origen de
 coordenadas en magnitudes diferentes con respecto a
 cada uno de los ejes longitudinales de las guías de
 25 onda; y
- un sensor para medir la potencia de un haz de
 salida dispuesto en cada uno de los cuatro puertos
 de salida de las guías de onda.

Adicionalmente, según una realización preferida de la
 30 presente invención, el dispositivo comprende además medios
 de cálculo para determinar el estado de polarización del
 haz incidente mediante el cálculo del vector de Stokes \vec{S} a
 partir de la inversa de la matriz de medida polarimétrica

\vec{W} y el vector de potencia \vec{P} , determinadas a su vez por los sensores, según la ecuación:

$$\vec{S} = \vec{W}^{-1}\vec{P}$$

Alternativamente, según otra realización preferida de la presente invención, el dispositivo comprende además medios de conexión con un dispositivo de cálculo externo (por ejemplo, un ordenador) para enviar los valores de potencia detectados por los sensores a dicho dispositivo de cálculo externo, encargándose este último de calcular el estado de polarización del haz incidente a partir de los valores de potencia enviados por los medios de conexión.

Según un segundo aspecto de la presente invención, se da a conocer un método para medir el estado de polarización de un haz incidente de radiación electromagnética. El método comprende las etapas de:

- a) hacer incidir un haz de radiación electromagnética sobre un difusor;
- b) difundir el haz incidente, mediante dicho difusor, a lo largo de cuatro direcciones definidas por dos guías de onda perpendiculares;
- c) medir la potencia de un haz de salida en cada una de las cuatro salidas de dichas dos guías de onda;
- d) calcular la matriz de medida polarimétrica \vec{W} y el vector de potencia \vec{P} correspondientes al haz incidente a partir de la potencia medida en la salida de las guías de onda; y
- e) calcular el vector de Stokes \vec{S} a partir de la inversa de la matriz de medida polarimétrica \vec{W} y el vector de potencia \vec{P} calculadas en la etapa d), siendo el vector de Stokes \vec{S} representativo del

estado de polarización del haz incidente.

Breve descripción de las figuras

La presente invención se entenderá mejor con
5 referencia a las siguientes figuras que ilustran una
realización preferida de la invención, proporcionada a modo
de ejemplo, y que no debe interpretarse como limitativa de
la invención de ninguna manera.

La figura 1 es una vista desde arriba de un
10 dispositivo según la realización preferida de la presente
invención.

La figura 2 es una vista en sección transversal del
dispositivo mostrado en la figura 1.

15 Descripción detallada de las realizaciones preferidas

A continuación se proporciona una descripción
detallada de una realización preferida de la presente
invención.

Las figuras 1 y 2 muestran una vista desde arriba y en
20 sección transversal, respectivamente, de la estructura de
un dispositivo según la realización preferida de la
presente invención para medir el EDP.

Tal como puede apreciarse en la figura 1, el
dispositivo comprende dos guías de onda (10, 20) situadas
25 sobre un mismo plano, perpendiculares entre sí y
perpendiculares a la dirección de propagación del haz
incidente (50) que va a medirse. Las guías de onda (10, 20)
están formadas por materiales dieléctricos o
semiconductores, preferiblemente transparentes a la
30 longitud de onda en consideración del haz incidente (50).
Preferiblemente las guías de onda son de un material
seleccionado del grupo que comprende silicio y nitruro de
silicio. Además, las guías de onda (10, 20) se intersecan

en una zona de intersección cuyo centro representa un origen de coordenadas sobre el que incide el haz incidente (50). En la figura 1 se muestra el origen de coordenadas como la intersección entre el eje x y el eje y, correspondiendo cada uno de estos ejes con el eje longitudinal de una de las guías de onda (10, 20). En la figura 2 se muestra el origen de coordenadas como la intersección entre el eje z y el eje x, correspondiendo el eje z al eje de desplazamiento del haz incidente (50).

Las guías de onda (10, 20) representan un primer medio (30). Para conseguir confinar la radiación electromagnética del haz incidente (50) en las mismas, se recubren por arriba y por abajo con dos medios (32, 34) también dieléctricos o semiconductores tales que sus índices de refracción (n_2 , n_3) a la longitud de onda de interés son menores que el índice de refracción (n_1) de las guías de onda (10, 20): $n_1 > n_2, n_3$.

Las guías de onda (10, 20) presentan una sección rectangular de anchura w y altura t . Si n_1 es suficientemente alto, las dimensiones de las guías de onda (10, 20) w y t serán menores que la longitud de onda de la radiación que pueden confinar y guiar.

El dispositivo comprende además un difusor (40) del haz incidente (50) que presenta preferiblemente simetría de revolución alrededor de un eje correspondiente a la dirección de propagación del haz incidente (50), es decir, alrededor del eje z según la representación en las figuras 1 y 2. El difusor (40) es de un material dieléctrico, metálico o semiconductor (no necesariamente transparente a la longitud de onda en consideración). En la realización mostrada en las figuras 1 y 2 se trata concretamente de un cilindro de diámetro D y altura h , siendo ambas dimensiones menores que la longitud de onda del haz incidente (50).

El difusor (40) se sitúa a nivel de la zona de intersección de las guías de onda (10, 20) y descentrado con respecto al origen de coordenadas en magnitudes diferentes con respecto a cada uno de los ejes
5 longitudinales de las guías de onda (10, 20). Dicho de otro modo, el centro del difusor (40) se encuentra en un punto definido por las coordenadas dx y dy , de tal manera que $dx \neq dy$ y $dx, dy \neq 0$. Dicha asimetría en el posicionamiento del difusor (40) es fundamental en el funcionamiento del
10 dispositivo como se mostrará a continuación.

Según la realización preferida de la presente invención mostrada en las figuras 1 y 2, el difusor (40) se sitúa sobre las guías de onda (10, 20). A lo largo de la memoria el término "sobre" podrá interpretarse tanto por
15 "encima" como por "debajo". También se prevé que en una realización alternativa el difusor (40) puede situarse dentro de la zona de intersección entre las dos guías de onda (10, 20), penetrando parcial o totalmente, por ejemplo creando un agujero de sección circular que atraviesa
20 completamente las guías de onda (10, 20) en la posición requerida.

En el caso de que el difusor (40) se sitúe dentro de la zona de intersección entre las dos guías de onda (10, 20), penetrando parcial o totalmente, el material del
25 difusor ha de ser distinto que el de las guías de onda. De este modo existe la discontinuidad necesaria para que el difusor pueda desarrollar su función adecuadamente.

En el caso de que el difusor (40) se sitúe sobre las guías de onda (10, 20), el propio aire que lo rodea provoca
30 la discontinuidad necesaria (aire-material del difusor), por lo que el difusor en este caso, puede ser de cualquier material, conductor, semiconductor, dieléctrico, etc., pudiendo ser del mismo material que el de las guías de onda

(10, 20).

Aunque no se muestra en las figuras, el dispositivo también comprende un sensor para medir la potencia de un haz de salida dispuesto en cada uno de los cuatro puertos
5 de salida de las guías de onda. Dicho sensor puede ser cualquier sensor conocido y usado habitualmente en la técnica con este fin y por tanto no se describirá adicionalmente en el presente documento.

Aunque no se muestra en las figuras adjuntas, el
10 dispositivo de la presente invención puede comprender además, en una realización preferida del mismo, medios de cálculo para determinar el estado de polarización del haz incidente (50) tal como se describió anteriormente en el presente documento. En concreto, el estado de polarización
15 se determina mediante el cálculo del vector de Stokes \vec{S} a partir de la inversa de la matriz de medida polarimétrica \vec{W} y el vector de potencia \vec{P} , determinadas a su vez por los sensores, según la siguiente ecuación:

$$\vec{S} = \vec{W}^{-1}\vec{P}$$

20 Según otra realización alternativa no mostrada en las figuras adjuntas, el dispositivo comprende además medios de conexión con un dispositivo de cálculo externo para enviar los valores de potencia detectados por los sensores a dicho dispositivo de cálculo externo. En este caso, dicho
25 dispositivo de cálculo externo, por ejemplo un ordenador, realiza los cálculos finales para la determinación del estado de polarización del haz incidente (50) tal como se describió anteriormente en el presente documento.

En concreto, al incidir una onda electromagnética
30 monocromática (con una longitud de onda λ) con dirección $-z$ sobre la intersección que contiene el difusor (40), éste

actuará como tal, difundiendo parte de la radiación electromagnética que le incide en todas las direcciones. Parte de la radiación electromagnética que difunde se acoplará a modos de las guías de onda (10, 20) (nótese que
5 las guías pueden ser multimodales) situadas bajo el difusor (40). Dicha radiación electromagnética se detecta a la salida de las guías de onda (10, 20), en cada uno de los cuatro puertos de salida (1, 2, 3, 4) a los que se dirige la radiación electromagnética tal como se muestra mediante
10 las flechas de la figura 1. Por ejemplo, la radiación electromagnética total que se guía hacia la dirección +x podrá detectarse como potencia P_1 en el puerto 1 (figura 1), y así sucesivamente para los puertos 2, 3 y 4.

Resulta clave que al colocar el difusor (40) de forma
15 asimétrica con respecto de los principales ejes de simetría del plano $z=0$, la respuesta del difusor (40) dependerá de la polarización de la radiación electromagnética incidente. Esto es debido al efecto Hall cuántico de espín de la luz, en especial, presente en los campos evanescentes de la
20 estructura propuesta. En particular, la potencia guiada hacia cada puerto de salida será diferente dependiendo de si la polarización de la radiación electromagnética monocromática incidente es lineal horizontal (H), lineal vertical (V), lineal oblicua a 45° (45), lineal oblicua a
25 135° (135), circular a derechas (R) o circular a izquierdas (L). Esto se debe a que al poner de forma asimétrica el difusor, la interacción entre la radiación electromagnética incidente y las guías de onda (10, 20) viene mediada por el solapamiento de la radiación electromagnética difundida con
30 los componentes de campo eléctrico de las ondas guiadas en las direcciones x e y en la región de campo evanescente por encima de las guías de onda (10, 20). Por tanto, la potencia guiada dependerá de la polarización de la onda

incidente (se mapea la polarización en potencia). Además, por la disposición asimétrica del difusor (40) también resulta que la potencia guiada hacia cada puerto de salida será diferente y no estarán relacionadas linealmente entre sí (esto no sucedería, por ejemplo, en el caso $dx=dy$). Por tanto, se obtienen cuatro mediciones de potencia dependientes de la polarización de entrada independientes entre sí, lo cual es equivalente a disponer de cuatro analizadores de polarización funcionando simultáneamente y en tiempo real. Es decir, se obtiene un polarímetro de Stokes cuya región activa tiene un tamaño mucho menor que la longitud de onda ($w, h, t, D < \lambda$).

Los coeficientes $b_{q,i}$ que posibilitan la construcción de la matriz \vec{W} se obtienen de forma muy sencilla (principalmente porque solo hay que medir potencia, no la fase) para la longitud de onda de iluminación $b_{q,i}$ como el cociente entre la potencia medida en el puerto de salida q -ésimo (de 1 a 4) cuando incide un haz de radiación electromagnética polarización ideal i (de nuevo, i puede ser H, V, 45, 135, R y L, siguiendo la nomenclatura de la definición de los parámetros de Stokes) y la densidad de potencia de la onda incidente. La obtención de la matriz \vec{W} para la longitud de onda λ equivale a calibrar el polarímetro de Stokes. Una vez calibrado permitiría la obtención inmediata del EDP de cualquier haz de radiación electromagnética incidente aplicando la ecuación (8) anterior. Tal como se mencionó anteriormente, la asimetría del dispositivo es la que hace que \vec{W} sea invertible.

A lo largo de la descripción anterior se ha considerado que el EDP se mide para una determinada longitud de onda del haz incidente (50), que es la longitud de onda para la que se determina la matriz \vec{W} . Sin

embargo, el dispositivo de la presente invención puede extenderse fácilmente a la determinación del EDP en múltiples longitudes de onda, ya que mientras las guías de onda no estén al corte, el dispositivo funcionará. De ese modo, si se mide el espectro óptico en los cuatro puertos de salida, será sencillo determinar la matriz \bar{W} para un cierto rango espectral, lo que posibilitaría que el dispositivo funcione a modo de un espectropolarímetro.

En un ejemplo práctico de realización para la medición con un haz incidente (50) a una longitud de onda de 1550 nm (correspondiente a la banda de tercera ventana de comunicaciones ópticas), se usarán guías de onda (10, 20) de silicio de dimensiones $w = 400$ nm, $t = 250$ nm. Debe indicarse que la longitud de las guías de onda (10, 20) no supone ninguna limitación en la implementación del dispositivo. El medio (32) por encima de las guías de onda (10, 20) es aire y el medio (34) por debajo de las mismas es dióxido de sílice. El difusor es un disco de oro de dimensiones $D = 200$ nm y $h = 40$ nm cuyo centro se sitúa en el punto definido por las coordenadas $dx = -50$ nm y $dy = 100$ nm.

El haz incidente (50) puede ser cualquier radiación electromagnética cuyo estado de polarización deba determinarse. Según una realización preferida de la presente invención, el haz incidente (50) es un haz de luz.

Según un segundo aspecto, la presente invención da a conocer un método para medir el estado de polarización de un haz incidente de radiación electromagnética que comprende las etapas de:

a) hacer incidir un haz de radiación electromagnética sobre un difusor que presenta preferiblemente simetría de revolución alrededor de un eje correspondiente a la dirección de propagación del

haz;

- b) difundir el haz incidente, mediante dicho difusor, a lo largo de cuatro direcciones definidas por dos guías de onda perpendiculares;
- 5 c) medir la potencia de un haz de salida en cada una de las cuatro salidas de dichas dos guías de onda;
- d) calcular la matriz de medida polarimétrica \vec{W} y el vector de potencia \vec{P} correspondientes al haz incidente a partir de la potencia medida en la salida de las guías de onda; y
- 10 e) calcular el vector de Stokes \vec{S} a partir de la inversa de la matriz de medida polarimétrica \vec{W} y el vector de potencia \vec{P} calculadas en la etapa d), siendo el vector de Stokes \vec{S} representativo del estado de polarización del haz incidente.
- 15

El método dado a conocer por la presente invención puede llevarse a cabo mediante el uso de un dispositivo según la presente invención, tal como se describió anteriormente en el presente documento. Por tanto, todas las limitaciones y preferencias anteriormente descritas relacionadas con el dispositivo de la presente invención también son aplicables al método según el segundo aspecto de la presente invención.

20

En el ejemplo práctico de realización descrito, se hizo incidir un haz de luz sobre el difusor, el cual difundió el haz incidente hacia las cuatro salidas definidas por las guías de onda. Se midió la potencia en cada una de las salidas mencionadas cuando el dispositivo se iluminó con luz de una longitud de onda de 1550 nm, una densidad de potencia de 1 mW/ μm^2 y seis EDPs diferentes, correspondientes a polarización lineal horizontal, polarización lineal vertical, polarización lineal oblicua a

25

30

45°, polarización lineal oblicua a 135°, polarización circular a derechas y polarización circular a izquierdas. Se determinaron los coeficientes $b_{q,i}$ en cada puerto de salida (q) para los seis estados de polarización (i) y se
 5 configuró la matriz de medida polarimétrica \vec{W} mediante la combinación apropiada de dichos coeficientes, tal y como se detalla al principio del presente documento, quedando la matriz de medida polarimétrica de la siguiente manera

$$\vec{W} = \begin{pmatrix} b_{1,H} + b_{1,V} & b_{1,H} - b_{1,V} & b_{1,45} - b_{1,135} & b_{1,R} - b_{1,L} \\ b_{2,H} + b_{2,V} & b_{2,H} - b_{2,V} & b_{2,45} - b_{2,135} & b_{2,R} - b_{2,L} \\ b_{3,H} + b_{3,V} & b_{3,H} - b_{3,V} & b_{3,45} - b_{3,135} & b_{3,R} - b_{3,L} \\ b_{4,H} + b_{4,V} & b_{4,H} - b_{4,V} & b_{4,45} - b_{4,135} & b_{4,R} - b_{4,L} \end{pmatrix}$$

10 El resultado de las combinaciones, representados en magnitudes de área efectiva (μm^2), fue el siguiente:

$$\vec{W} = 10^{-3} \begin{pmatrix} 58.16 & -57.98 & 4.43 & 2.34 \\ 63.47 & 60.74 & -18.85 & 1.23 \\ 67.66 & -63.33 & -22.94 & -4.18 \\ 53.02 & 52.56 & -6.82 & -2.74 \end{pmatrix}$$

Una vez calculada la matriz de medida polarimétrica, se midió la potencia en cada una de las salidas para un haz
 15 incidente con un estado de polarización cualquiera, a partir de la cual, y junto con la inversa de la matriz de medida polarimétrica \vec{W} , se pudo calcular el vector de Stokes representativo del estado de polarización del haz incidente.

20 Por ejemplo, consideramos incidencia con polarización lineal a 50° respecto del eje de coordenadas x. Para este haz incidente y la configuración descrita, el resultado de la potencia recibida en las salidas tomando dos decimales fue (en mW):

$$\vec{P}_{50} = 10^{-3} \begin{pmatrix} 68.3 \\ 38.72 \\ 51.1 \\ 41.05 \end{pmatrix}$$

25

A partir de la potencia medida en las cuatro salidas para el haz de luz con polarización lineal a 50° (\vec{P}_{50}) y la inversa de la matriz de medida polarimétrica \vec{W} , se pudo calcular el vector de Stokes representativo del estado de polarización del haz incidente (en $\text{mW}/\mu\text{m}^2$)

$$\vec{S}_{50} = \vec{W}^{-1} \vec{P}_{50} = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.0988 \\ 0.9943 \\ 0 \end{pmatrix}$$

que se ajusta muy bien al vector de Stokes representativo de un haz de luz con un estado de polarización lineal ideal con una inclinación de 50 grados, con mínimas diferencias por el hecho de truncar los cálculos a dos decimales así como a pequeñas inestabilidades en la reconstrucción del vector de Stokes \vec{S} mediante la matriz de medida polarimétrica \vec{W} . Estas inestabilidades pueden corregirse mediante el condicionamiento de la matriz de medida polarimétrica. En la configuración preferente estudiada como ejemplo tenemos un número de condicionamiento de la matriz de $\kappa = 41.5$, siendo el número de condicionamiento óptimo $\kappa_{opt} = \sqrt{20}$.

Tal como puede apreciarse a partir de la descripción anterior, la presente invención, y en concreto la realización preferida de la misma, proporciona una serie de ventajas con respecto a los dispositivos conocidos de la técnica anterior, tales como por ejemplo:

- Permite obtener los cuatro parámetros de Stokes.
- El dispositivo es de aplicación universal: a pesar del gran interés de la medición del EDP de la luz, el dispositivo de la presente invención puede aplicarse a cualquier frecuencia de la radiación electromagnética en consideración.
- El tamaño de la región activa en la que se mide la

polarización es menor que la longitud de onda incidente (miniaturización del dispositivo de medición).

- Puede usarse para medir el EDP en un enorme rango espectral, siendo por tanto factible su uso en
5 espectropolarimetría.

- Puede fabricarse usando tecnología estándar de micro-fabricación en silicio, evitando así la inclusión de metales nanoestructurados, lo que repercutirá en un bajo coste de fabricación a gran escala.

10 - No necesita componentes mecánicos, y permite por tanto la medición del EDP en tiempo real.

- Permite la medición del EDP de luz que se propaga en espacio libre así como de luz dentro de una fibra óptica en configuración en línea.

15

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo para medir el estado de polarización de un haz incidente (50) de radiación electromagnética que comprende:
 - dos guías de onda (10, 20) perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación del haz incidente (50), formadas por materiales dieléctricos o semiconductores que se intersecan en una zona de intersección cuyo centro representa un origen de coordenadas sobre el que incide el haz incidente (50);
 - dos medios (32, 34), también dieléctricos o semiconductores, que recubren por arriba y por abajo dichas guías de onda (10, 20) de tal manera que sus índices de refracción a la longitud de onda del haz incidente (50) son menores que el índice de refracción de las guías de onda (10, 20);
 - un difusor (40) del haz incidente (50) situado en la zona de intersección de las guías de onda (10, 20) y descentrado con respecto al origen de coordenadas en magnitudes diferentes con respecto a cada uno de los ejes longitudinales de las guías de onda (10, 20); y
 - un sensor para medir la potencia de un haz de salida dispuesto en cada uno de los cuatro puertos de salida (1, 2, 3, 4) de las guías de onda (10, 20).
2. Dispositivo según la reivindicación 1, caracterizado por que el difusor (40) se sitúa sobre las guías de onda (10, 20).
3. Dispositivo según la reivindicación 1, caracterizado por que el difusor (40) se sitúa dentro de la zona de

intersección entre las dos guías de onda (10, 20).

4. Dispositivo según la reivindicación 3, caracterizado por que el difusor (40) es de un material distinto al de las guías de onda (10, 20).
- 5 5. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el difusor (40) del haz incidente (50) presenta simetría de revolución alrededor de un eje correspondiente a la dirección de propagación del haz incidente (50).
- 10 6. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende además medios de cálculo para determinar el estado de polarización del haz incidente (50) mediante el cálculo del vector de Stokes \vec{S} a partir de la inversa de la matriz de medida polarimétrica \vec{W} y el vector de potencia \vec{P} , determinadas a su vez por los sensores, según la siguiente ecuación:
- 15

$$\vec{S} = \vec{W}^{-1}\vec{P}$$

7. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que comprende además medios de conexión con un dispositivo de cálculo externo para enviar los valores de potencia detectados por los sensores a dicho dispositivo de cálculo externo.
- 20
8. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el difusor (40) es de un material seleccionado del grupo que comprende oro y aluminio.
- 25
9. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que las guías de onda (10, 20) son de un material transparente a la longitud de onda del haz incidente (50).
- 30

10. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que las guías de onda (10, 20) son de un material seleccionado del grupo que comprende silicio y nitruro de silicio.
- 5 11. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el medio (32) que recubre por arriba las guías de onda (10, 20) es aire.
12. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el medio (34) que
10 recubre por abajo las guías de onda (10, 20) es dióxido de sílice.
13. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el difusor (40) es un cilindro cuyo diámetro D y altura h son menores que
15 la longitud de onda del haz incidente (50).
14. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que las guías de onda (10, 20) presentan una sección rectangular cuya anchura w y altura t son menores que la longitud de
20 onda del haz incidente (50).
15. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el haz incidente (50) es un haz de luz.
16. Método para medir el estado de polarización de un haz
25 incidente de radiación electromagnética que comprende las etapas de:
- a) hacer incidir un haz de radiación electromagnética sobre un difusor;
- b) difundir el haz incidente, mediante dicho difusor,
30 a lo largo de cuatro direcciones definidas por dos guías de onda perpendiculares;
- c) medir la potencia de un haz de salida en cada una de las cuatro salidas de dichas dos guías de onda;

- d) calcular la matriz de medida polarimétrica \vec{W} y el vector de potencia \vec{P} correspondientes al haz incidente a partir de la potencia medida en la salida de las guías de onda; y
- 5 e) calcular el vector de Stokes \vec{S} a partir de la inversa de la matriz de medida polarimétrica \vec{W} y el vector de potencia \vec{P} calculadas en la etapa d), siendo el vector de Stokes \vec{S} representativo del estado de polarización del haz incidente.
- 10 17. Método según la reivindicación 16, caracterizado por que el haz incidente es un haz de luz.
18. Método según cualquiera de las reivindicaciones 16 y 17, caracterizado por que se lleva a cabo mediante el uso de un dispositivo según una cualquiera de las
- 15 reivindicaciones 1 a 15.

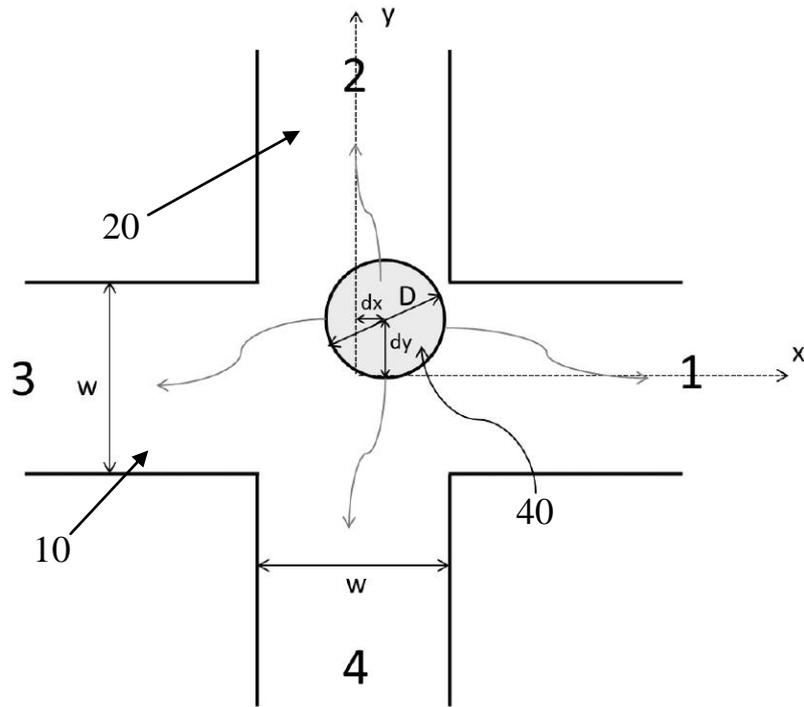


FIG. 1

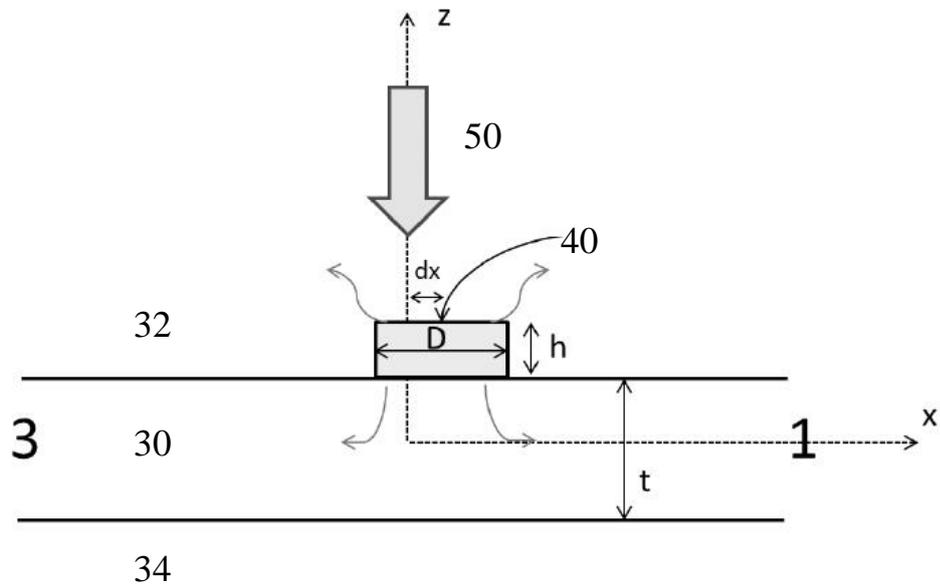


FIG. 2



- ②① N.º solicitud: 201630162
 ②② Fecha de presentación de la solicitud: 11.02.2016
 ③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: **G01J4/04** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	US 6211957 B1 (ERDOGAN, T. et al.) 03.04.2001, resumen; columna 1, línea 61 – columna 2, línea 33; columna 4, línea 48 – columna 7, línea 20; columna 10, línea 48 – columna 11, línea 34; figuras 1,6.	1-3,6,7,9,10,14-18
A	JP 2010263021 A (PANASONIC CORP.) 18.11.2010, todo el documento.	1-3,6,7,9-12,14-18
A	US 7327456 B1 (WOOLLAM, J. et al.) 05.02.2008, todo el documento.	1-3,6,7,9,10,14-18
A	XIE, Y.-B. et al.: "Miniature polarization analyzer based on surface plasmon polaritons", Appl. Phys. Lett. 105, 101107, 2014, páginas 1-4.	1,6,7,9,10,15-18
A	US 7158231 B1 (WOOLLAM, J. et al.) 02.01.2007	
A	PORS, A. et al.: "Plasmonic metagratings for simultaneous determination of Stokes parameters", Optica, Agosto de 2015, Vol. 2, N° 8, páginas 716-723.	

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia
 Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
 A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita
 P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
 E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

<p>Fecha de realización del informe 06.04.2016</p>	<p>Examinador Ó. González Peñalba</p>	<p>Página 1/4</p>
---	--	------------------------------

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01J, H01P, G02B

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, INSPEC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 06.04.2016

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones 1-18	SI
	Reivindicaciones	NO
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones 1-18	SI
	Reivindicaciones	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	US 6211957 B1 (ERDOGAN, T. et al.)	03.04.2001
D02	JP 2010263021 A (PANASONIC CORP.)	18.11.2010

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

Se ha considerado, dentro del límite de tiempo establecido al efecto, que la invención definida en las reivindicaciones 1-18 de la presente Solicitud tiene novedad y actividad inventiva por no estar incluida en el estado de la técnica ni poder deducirse de este de un modo evidente por un experto en la materia.

Se han encontrado en el estado de la técnica numerosos dispositivos elipsómetros o medidores del estado de polarización de un haz incidente, basados en guías de onda de materiales semiconductores. Así, por ejemplo, el documento D01, citado por el Solicitante y también en el presente Informe sobre el Estado de la Técnica (IET) con la categoría A, y considerado entre los más próximos al objeto inventivo antes esbozado, describe un polarímetro capaz de trabajar, como la invención, en disposición en línea, con transmisión en fibra óptica, y que comprende una pluralidad de rejillas de difracción en la fibra, orientadas de manera precisa y con un paso de rejilla predeterminado tal, que cada rejilla desacopla una parte predeterminada de la señal óptica que pasa a través del polarímetro. Un detector independiente está asociado con cada rejilla para medir la señal desacoplada, de tal modo que las intensidades medidas pueden utilizarse, como en la invención, para el cálculo de los cuatro parámetros de Stokes, determinantes del estado de polarización. Hasta aquí llegan, sin embargo, las similitudes con la invención, pues la naturaleza y disposición física de los medios para el desacoplo de las señales de medida son del todo diferentes, y nada induce a pensar en las características esenciales de la invención (disposición cruciforme de guías de onda, elemento difusor,...) partiendo de este documento.

Por su parte, el documento D02, también citado en el IET con la categoría A, como mero reflejo del estado de la técnica en este campo de polarimetría de haces, divulga un sensor para la detección del plano de polarización de un haz de luz incidente, que, similarmente a la invención, está integrado en materiales conductores ópticos (silicio) y tiene varios fotodiodos (en concreto, dos), precedidos, según la trayectoria del haz incidente, por sendos polarizadores, primario y secundario, que dejan pasar respectivas componentes de polarización de la luz incidente en diversas direcciones. Se han dispuesto unos píxeles unitarios con un efecto de difusión flotante y con partes de apantallamiento que bloquean la luz diagonal inyectada en difusión flotante desde los polarizadores. De nuevo, en D02, los fundamentos, construcción y disposición de elementos físicos implicados en la medición del estado de polarización son diferentes al presente objeto inventivo. Cabe concluir, por tanto, que la invención se diferencia esencialmente de los anteriores documentos y, en general, del estado de la técnica considerado, y tiene, en consecuencia, novedad y actividad inventiva de acuerdo con los Artículos 6 y 8 de la vigente Ley de Patentes.