

Haces no uniformemente polarizados para medidas polarimétricas de medios homogéneos y transparentes

Non-uniformly polarized fields for polarimetry measurements of homogeneous and transparent samples

Javier de AREBA IGLESIAS⁽¹⁾, Gemma PIQUERO SANZ⁽¹⁾, J. Carlos GONZÁLEZ DE SANDE⁽²⁾, Massimo SANTARSIERO⁽³⁾, Franco GORI⁽³⁾

1. Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid.
2. Departamento de Ingeniería de Circuitos y Sistemas, EUIT de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Carretera de Valencia km 7, 28031 Madrid.
3. Dipartimento di Fisica, Università Roma Tre, and CNISM, via della Vasca Navale 84, I-00146 Roma, Italia.

Persona de contacto: Gemma Piquero Sanz (piquero@ucm.es).

RESUMEN:

En este trabajo se propone el uso de diversos tipos de haces no-uniformemente y totalmente polarizados en medidas polarimétricas de muestras homogéneas y transparentes. Como ejemplos concretos de este tipo de haces se proponen los haces espiralmente polarizados y haces a la salida de medios uniaxiales anisótropos con el eje óptico en la dirección de propagación. Dichos haces se representan mediante modelos analíticos sencillos, teniendo en cuenta el carácter vectorial de los mismos, los cuales permiten conocer el campo en cualquier plano en propagación libre y a través de medios o sistemas que pueden ser descritos mediante matrices de Müller. Mediante el uso de haces no-uniformemente y totalmente polarizados se simplifica notablemente el proceso de medida, siendo suficientes una o dos medidas según el haz utilizado, para la obtención de todos los elementos de la matriz de Müller de la muestra.

Palabras clave: Polarización, polarimetría, haces no-uniformemente polarizados y caracterización de muestras.

ABSTRACT:

In this work the use of non-uniformly and totally polarized fields in polarimetric measurements of homogeneous and transparent samples is proposed. As particular examples of this kind of fields, spirally polarized fields and fields at the output of uniaxial anisotropic media, with its optics axis along the propagation direction, are considered. Such fields are represented by simple analytical models, taking the vectorial nature of light into account. By means of these models, the fields at any plane upon free propagation or after passing through media or systems described by Müller matrices, can be calculated. By using non-uniformly and totally polarized fields the measurement procedure is significantly simplified. Depending on the field to be used only one or two measurements are required for obtaining all the elements of the Müller matrix of the sample.

Keywords: Polarization, polarimetry, non-uniformly polarized fields, sample characterization.

1.- Introducción

Recientemente existe un creciente interés en obtener información de características ópticas de determinadas muestras, por ejemplo tejidos biológicos, mediante el estudio de las modificaciones sobre la luz polarizada incidente [1]. Se han propuesto diversos métodos para obtener información sobre las muestras, por ejemplo el estudio del grado de polarización usando luz linealmente polarizada en el diagnóstico clínico de muchos cánceres [2]. Otra de las formas de obtener información sobre un determinado medio o una determinada muestra es mediante medidas polarimétricas [3, 4]. La muestra se puede caracterizar mediante una matriz de Müller de 16 elementos.

Con el fin de obtener todos los elementos de la matriz de Müller generalmente se incide con luz cuyo estado de polarización se va variando mediante polarizadores o láminas de fase hasta completar un conjunto de 16 medidas. Otros métodos usan una lámina de fase cuarto de onda rotando seguida de un polarizador y, por medio de análisis de Fourier, determinan el cambio del estado de polarización producido por la muestra para un conjunto relativamente amplio de estados de polarización incidentes. Recientemente se están investigando otros procedimientos que sean más rápidos y más sencillos de aplicar y no requieran muchos cambios en la disposición experimental y así evitar posibles problemas como desalineamientos. Uno de estos métodos consiste en usar redes de polarización para generar distintos estados de polarización al mismo tiempo [5, 6]. Otras técnicas emplean moduladores espaciales de la polarización para generar una distribución inhomogénea de la polarización en la sección transversal del haz y retardadores variables de cristal líquido para el análisis del estado de polarización a la salida del medio [7, 8]. En estos métodos, con una sola o pocas medidas se caracteriza completamente la matriz de Müller de la muestra a analizar. Uno de los problemas que pueden tener este tipo de medidas es que la distribución de polarización en la sección transversal de los haces utilizados va cambiando al propagarse y en muchos casos no es fácil estudiar cómo va evolucionando.

En este trabajo proponemos usar haces no-uniformemente y totalmente polarizados (NUTP) para realizar medidas polarimétricas de muestras homogéneas y transparentes. Los haces propuestos son descritos mediante expresiones analíticas sencillas y, o bien son invariantes en propagación, o la ley de propagación es sencilla, es decir el estado de polarización es conocido en cada plano y en cada punto de la sección transversal del haz. Se propone, por un lado el uso de los denominados haces espiralmente polarizados (SP) que han sido objeto de múltiples estudios en los últimos años [9, 10]. Como casos particulares de los haces SP están los haces radialmente y azimutalmente polarizados, cuyas aplicaciones son innumerables. Los haces SP tienen la ventaja de que dependiendo de cómo hayan sido generados presentan una distribución de polarización en la sección transversal del haz invariante en propagación. Esto hace que las medidas puedan realizarse con la muestra posicionada en cualquier plano. Como veremos con más detalle, con este tipo de haces serán suficientes sólo dos medidas. El otro caso particular de haces NUTP propuestos son los haces generados a la salida de cristales uniáxicos anisótropos (p. ej. calcita) cuando un haz ligeramente divergente se propaga a lo largo del eje óptico [11]. En este caso con una sola medida es suficiente para obtener todos los elementos de la matriz de Müller.

Este trabajo está organizado de manera que esta sección constituye la Introducción. En la Sec. 2 se presenta el formalismo a utilizar. En la Sec. 3 se describen y analizan los montajes ópticos y los métodos de medida propuestos cuando se emplea cada uno de los dos haces NUTP citados anteriormente y se exponen los resultados más relevantes en cada caso. Finalmente en la Sec. 4 se resumen brevemente las conclusiones obtenidas.

2.- Formalismo

La polarización de la luz puede ser completamente descrita utilizando el vector de Stokes, dado por [12, 13]

$$S = \begin{pmatrix} s_0(\mathbf{r}) \\ s_1(\mathbf{r}) \\ s_2(\mathbf{r}) \\ s_3(\mathbf{r}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{0^\circ}(\mathbf{r}) + I_{90^\circ}(\mathbf{r}) \\ I_{0^\circ}(\mathbf{r}) - I_{90^\circ}(\mathbf{r}) \\ I_{45^\circ}(\mathbf{r}) - I_{135^\circ}(\mathbf{r}) \\ I_{45^\circ, \lambda/4}(\mathbf{r}) - I_{135^\circ, \lambda/4}(\mathbf{r}) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$S^{in}(\theta, \alpha) = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -\cos(2\alpha + 2\theta) \\ -\text{sen}(2\alpha + 2\theta) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

donde \mathbf{r} es un vector de posición en el plano transversal del haz, I_θ y $I_{\theta, \lambda/4}$ representan la irradiancia en cada punto de la sección transversal del haz y los subíndices se refieren al ángulo, θ , que forma el eje de transmisión del polarizador con la dirección x y a la presencia o no de lámina $\lambda/4$ en el momento de la medida. Con esta definición, las componentes del vector de Stokes, o parámetros de Stokes son cantidades medibles. En concreto, $s_0(\mathbf{r})$ representa la irradiancia del haz en el punto \mathbf{r} , $s_1(\mathbf{r})$ es igual a la diferencia entre la cantidad de luz linealmente polarizada a 0° y la cantidad de luz linealmente polarizada a 90° contenidas en el punto \mathbf{r} del campo. El significado de $s_2(\mathbf{r})$ es análogo al de $s_1(\mathbf{r})$ pero considerando estados lineales de polarización a 45° y 135° . Por último $s_3(\mathbf{r})$ proporciona el exceso de polarización circular a derechas respecto de polarización circular a izquierdas en dicho punto \mathbf{r} .

La relación de los vectores de Stokes a la entrada y salida de la muestra viene dada por

$$S^{out} = M S^{in}, \quad (2)$$

donde el superíndice “in” indica entrada y “out” salida y M es una matriz 4×4 que caracteriza a la muestra (matriz de Müller). Entonces, conocido el vector de Stokes a la entrada y midiendo el vector de Stokes a la salida en distintos puntos o direcciones de la sección transversal podemos obtener todos los elementos m_{ij} (con $i, j=1, 2, 3, 4$) de la matriz M .

3.- Resultados

3.1.- Polarimetría con haces espiralmente polarizados.

Los haces espiralmente polarizados son haces NUTP cuya dirección del campo eléctrico forma un ángulo α con la dirección azimutal en cada punto (véase la Fig. 1). Para estos haces, el vector de Stokes viene dado por

donde α es el ángulo que forma el campo eléctrico con la dirección azimutal, e I_0 la irradiancia del haz incidente colimado, que debe ser nula en el centro debido a que la polarización no está definida en ese punto.

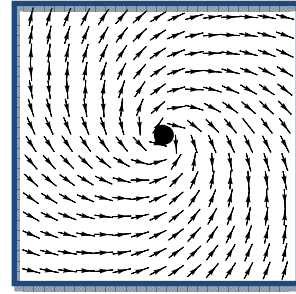


Fig. 1: Distribución de polarización de un haz espiralmente polarizado con $\alpha = \pi/6$, donde las flechas representan la dirección del campo eléctrico en cada punto.

Estos haces pueden ser generados de forma sencilla usando los denominados “axis finder” y un rotador, constituido por dos láminas de fase $\lambda/2$, con cierto ángulo entre ellas [10]. Para poder obtener todos los elementos de la matriz de Müller, M , necesitamos que el parámetro $s_3(\mathbf{r})$ sea no nulo, por tanto, además del haz espiralmente polarizado, será necesario usar, por ejemplo, una lámina de fase $\lambda/4$ y realizar medidas para dos ángulos β (ángulo que forma uno de los ejes de la lámina con el eje x). De esta manera, el haz incidente viene dado por el vector de Stokes

$$S^{in}(\theta, \alpha, \beta) = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -\cos(2\beta) \cos[2(\alpha - \beta + \theta)] \\ -\text{sen}(2\beta) \cos[2(\alpha - \beta + \theta)] \\ \text{sen}[2(\alpha - \beta + \theta)] \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Para poder obtener todos los elementos de la matriz de Müller de la muestra existen varias combinaciones posibles de los datos obtenidos. Una de ellas es medir con un haz radialmente polarizado $\alpha=0$. Mediante un polarizador, una lámina de fase $\lambda/4$ y una

cámara CCD se toma una medida de los parámetros de Stokes en toda la sección transversal del haz, dado por la Ec. (4) [10]. Primero con la lámina $\lambda/4$ a $\beta=0$ y usando los datos para los ángulos $\theta=0, \pi/2, \pi/4$, se obtiene la primera, segunda y tercera columna de la matriz M . Con una segunda medida con la lámina a $\beta=\pi/3$ y $\theta=0$ se obtiene la tercera columna.

3.2.- Polarimetría con haces a la salida de medios uniáxicos anisótropos.

En este caso suponemos un haz láser ligeramente divergente propagándose en la dirección del eje óptico de un cristal de calcita (véase la Fig. 2). Mediante un análisis simplificado de su propagación a través del cristal, podemos escribir el vector de Stokes a la salida como [11],

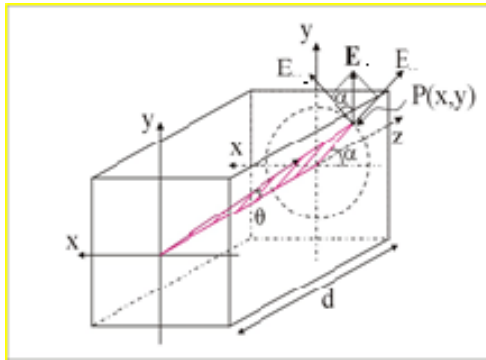


Fig.2: Propagación de un haz linealmente polarizado en la dirección del eje y a través de un cristal de calcita con el eje óptico en la dirección de propagación, z.

$$S^{in}(r, \theta) = I_{0r}(r) \begin{pmatrix} 1 \\ -\cos^2(2\theta) - \sin^2(2\theta)\cos\delta(r) \\ \cos(2\theta)\sin(2\theta)[1 - \cos\delta(r)] \\ -\sin(2\theta)\sin\delta(r) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

donde

$$\alpha(r) = k \Delta n \frac{r^2}{\sqrt{r^2 + d^2}} \quad (6)$$

con $\Delta n = |n_o - n_e|$, siendo n_o y n_e los índices ordinario y extraordinario, respectivamente y d el espesor del cristal.

La distribución de polarización de este haz ha sido representada en la Fig. 3 para un haz

láser de He-Ne incidiendo sobre un cristal de calcita de 20 mm de espesor.

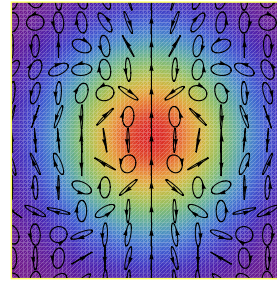


Fig.3: Distribución de la polarización a la salida de un cristal de calcita con un haz gaussiano propagándose a lo largo de su eje óptico.

En la Fig. 4, se muestran los parámetros de Stokes en un plano transversal del haz a la salida del cristal anisótropo. Situando una muestra (supuesta de espesor despreciable) en este plano y con una sola medida de los parámetros de Stokes en cada punto del plano transversal del haz mediante un polarizador, una lámina de fase $\lambda/4$ y una cámara CCD es suficiente para obtener todos los elementos de la matriz de Müller.

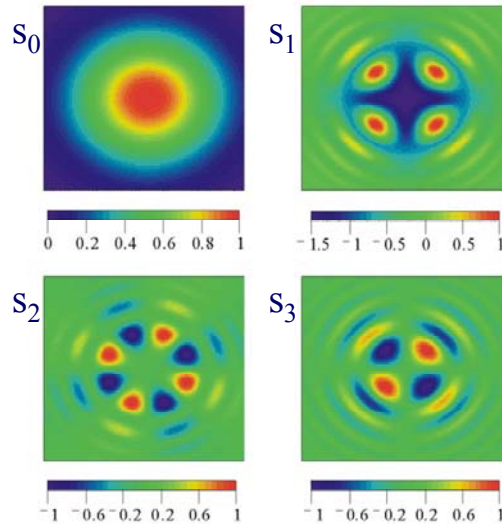


Fig.4: Parámetros de Stokes a la salida de un cristal de calcita con el eje óptico en la dirección de propagación.

Así, por ejemplo, tomando los valores para $\theta=0, \pi/4, -\pi/4, \pi/3$ y $-\pi/3$ y sumando o restando los parámetros de Stokes correspondientes a cada ángulo θ , se puede obtener un conjunto de 16 ecuaciones lineales indepen-

dientes que permiten obtener todos los valores m_{ij} .

4.- Conclusión

En este trabajo se propone un método de caracterización de muestras transparentes y homogéneas mediante medidas polarimétricas. En vez de ir modificando el estado de polarización del haz a la entrada, utilizamos haces no uniformemente polarizados, que pueden ser descritos con expresiones analíticas sencillas. Con una o dos medidas podemos obtener todos los elementos de la matriz de Müller, que caracteriza la muestra. Se han presentado dos ejemplos sencillos, utilización de los haces espiralmente polarizados y haz a la salida de un cristal de calcita con eje óptico situado en la dirección de propagación.

Agradecimientos:

G.P. agradece al proyecto FIS2010-17543 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

Referencias

- [1] Valery V. TUCHIN, Lihong V. WANG, Dmitry A. ZYMAYAKOV, "Optical Polarization in Biomedical Applications", (Springer, 2006).
- [2] Steven. L. JACQUES, Jessica R. RAMELLA-ROMAN and Ken LEE, "Imaging skin pathology with polarized light", J. Biomed. Opt. 7, 3, 329-340, 2002.
- [3] Russel. A. CHIPMAN, "Polarimetry" Chap. 22 in the Handbook of Optics, vol. II, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [4] Jesús J. GIL, "Polarimetric characterization of light and media" The Eur. Phys. J. Appl. Physics, 40, 1-47, 2007.
- [5] Franco GORI, "Measuring Stokes parameters by means of a polarization grating", Opt. Lett. 24, 584, 1999.
- [6] Yuri GORODETSKI, Gabriel BIENER, Avi NIV, Vladimir KLEINER, and Erez HASMAN, "Space-variant polarization manipulation for far-field polarimetry by use of subwavelength dielectric gratings", Opt. Lett. 30, 17, 2245-2247, 2005.
- [7] Santosh TRIPATHI and Kimani C. TOUSSAINT, "Rapid Müller matrix polarimetry based on parallelized polarization state generation and detection", Optics Express, Vol. 17, Issue 24, pp. 21396-21407, 2009.
- [8] Fiona KENNY, Oscar RODRIGUEZ, David LARA, Chris DAINTY. "Vectorial polarimeter using an inhomogeneous polarization state generator", Frontiers in Optics, FThQ5, 2011.
- [9] Franco GORI, "Polarization basis for vortex beams", J. Opt. Soc. Am. A, 18, 7, 1612-1617 (2001)
- [10] V. RAMÍREZ-SÁNCHEZ, G. PIQUERO, M. SANTARSIERO, "Generation and characterization of spirally polarized fields", J. Opt. A: Pure and Appl. Opt., 11, 085708, 2009.
- [11] Gemma PIQUERO, Javier VARGAS-BALBUENA, "Non-uniformly polarized beams across their transverse profiles: an introductory study for undergraduate optics courses", Eur. J. Phys. 25, 793-800, 2004.
- [12] Emil WOLF, "Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light", (Cambridge University Press, 2007).
- [13] Rosario MARTÍNEZ- HERRERO, Pedro M. MEJÍAS, Gemma PIQUERO, "Characterization of partially polarized light fields", (Springer-Series in Optical Sciences 147, 2009).