

ACTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA DE MEDIOS QUIRALES BASADOS EN MANIVELAS

Gregorio J. Molina-Cuberos⁽¹⁾, Ángel J. García-Collado⁽²⁾, José Margineda⁽¹⁾,
Ernesto Martín⁽¹⁾, María J. Núñez⁽¹⁾

gregomc@um.es, ajgarcia@pdi.ucam.edu, jmargi@um.es, ernesto@um.es, maripepa@um.es

⁽¹⁾ Dpto. de Física, Facultad de Químicas, Universidad de Murcia, Murcia, España

⁽²⁾ Dpto. de Ciencias Politécnicas, Universidad Católica San Antonio, Guadalupe-Murcia, España

Abstract- Materials with electromagnetic activity are usually made by spreading helices inclusions into a host medium. In previous work, a new manufacturing technique based on the inclusion of few three segment wire hooks (cranks) was presented and the rotation of the polarisation angle in circular waveguide discussed. Here we present that the random inclusion of many cranks into a host medium produces electromagnetically active materials. Based on a free-wave experimental system, we have found that the transmitted wave through the material is rotated with respect to the incident one. First results seem to be in agreement with the typical behaviour of chiral media at the resonant frequency.

I. INTRODUCCIÓN

La propiedad de algunos medios de girar el plano de polarización de un haz linealmente polarizado, conocida como actividad óptica, fue descubierta en 1815 por el físico Jean-Baptiste Biot. Louis Pasteur [1] estudió el efecto mientras estaba realizando un trabajo sobre sales del ácido tartárico, al observar que el tartrato de sodio y amonio, ópticamente inactivo, existía como una mezcla de dos clases diferentes de cristales que eran imágenes especulares entre sí. Separó la mezcla en dos partes, una de cristales derechos y otra de izquierdos, cada grupo de cristales por separado resultaba ser ópticamente activo. Además, las rotaciones específicas de ambas soluciones eran iguales, pero de signo contrario; es decir, una solución hacía rotar la luz polarizada en un plano hacia la derecha y, la otra, un número igual de grados hacia la izquierda. En todas las demás propiedades, ambas sustancias eran idénticas. Una muestra racémica con igual número de cristales de ambos tipos no produce ningún giro. La frecuencia a la que se presenta la actividad viene determinada por el tamaño del cristal, el caso más común, el descrito por Pasteur, se aprecia en el espectro visible.

Hasta la fecha no se han encontrado elementos en la naturaleza capaces de producir la misma actividad en el intervalo de las frecuencias de microondas, por tanto es necesario fabricarlos artificialmente. A principios del siglo XX Lindman [2]-[3] fabricó, mediante hélices formadas por hilos de cobre de 9 cm, el primer medio capaz de producir actividad electromagnética para frecuencias entorno a 1-3 GHz. En la actualidad son varios los laboratorios que han diseñado materiales con actividad electromagnética, comúnmente llamados medios quirales [4]-[5]. El método usual de fabricación consiste en introducir en un medio

dieléctrico, de la forma más homogénea posible, pequeñas estructuras con simetría quiral, hélices en la mayoría de los casos. Los composites así contruidos producen un giro en la polarización de una onda electromagnética linealmente polarizada, de manera idéntica en la que los medios estudiados por Pasteur lo hacen en el rango visible. El tamaño de las estructuras quirales individuales determina la banda de frecuencias donde aparecen las propiedades características de estos medios.

Esta técnica ha sido utilizada para diseñar y fabricar medios con actividad electromagnética a frecuencias de microondas mediante la inclusión de hélices de acero inoxidable de entre 3 y 4 vueltas, 1.2 mm de diámetro, 20 mm de longitud y 0.6 mm de paso en una resina dieléctrica [6]. Mediante técnica de medio libre se mostró que las muestras giraban el ángulo de polarización de una onda linealmente polarizada, además se pudo caracterizar el material mediante la determinación experimental de su permitividad, permeabilidad y parámetro de quiralidad, también denominado de Pasteur [6]-[7].

Cloete et al. [8] emplearon, por primera vez, elementos quirales fabricados a partir de un hilo conductor doblado en tres segmentos, lo que denominó *crank* (manivela). El objetivo de su estudio no estaba relacionado con la actividad electromagnética, sino que pretendía determinar si la quiralidad afecta a las propiedades de absorción de un material. Para ello se construyeron medios quirales y no quirales fabricados mediante la inclusión de elementos con simetría quiral y aquiral de idénticas dimensiones. Se encontró que la absorción se encuentra ligada a la frecuencia de resonancia del elemento, sin que la quiralidad jugara un papel decisivo.

Recientemente, nuestro grupo de trabajo ha encontrado que elementos quirales similares a los propuestos por [8] en medio guiado eran capaces de alterar el ángulo de polarización de una onda electromagnética [9]. Si bien, en este estudio no queda claro si el giro se debe a un efecto de la quiralidad o a la eliminación del campo tangencial a los segmentos de los conductores que forman las muestras. Un método de fabricación alternativo a [9] se basa en desarrollar los elementos quirales sobre pistas de circuito impreso [10]. De este modo se logra fabricar muestras más precisas y reproducibles, aunque dado el bajo número de elementos quirales utilizados las muestras obtenidas siguen siendo

anisótropas. Las muestras desarrolladas en circuito impreso restringen el diseño ya que, entre otros aspectos, fijan una de las dimensiones de los elementos quirales, que viene determinada por el grosor del sustrato utilizado.

Siguiendo la línea desarrollada en los últimos años, en este trabajo proponemos la fabricación de medios quirales que presenten actividad electromagnética mediante la inclusión en un dieléctrico de manivelas de segmentos iguales o distintos. Utilizando un sistema experimental de medición en medio libre, vamos a mostrar que los medios son capaces de rotar la polarización de una onda linealmente polarizada. Además vamos a analizar el efecto de la simetría en los segmentos que constituyen la manivela.

II. DISEÑO DE MATERIALES QUIRALES MEDIANTE LA INCLUSION DE MANIVELAS

La técnica de fabricación empleada consiste en distribuir, de forma aleatoria, elementos quirales individuales en una matriz de material dieléctrico homogéneo, de manera similar a la utilizada anteriormente con medios basados en hélices [6]. Los elementos quirales han sido construidos a partir de un hilo recto de cobre de 0.4 mm de diámetro y 12.6 mm de longitud. El hilo se dobla en tres segmentos mediante dos ángulos rectos formando una estructura tridimensional. El elemento final es distribuido por una resina epoxy. Con el objetivo de conseguir un material homogéneo, los elementos se distribuyen aleatoriamente por la superficie y en todas las direcciones del espacio. Las propiedades mecánicas de la resina permiten cualquier orientación de los elementos quirales; se ha tenido especial cuidado en lograr una distribución sin orientaciones ni posiciones privilegiadas. Una vez colocada una capa, se recubre con resina y se distribuye una nueva capa de manivelas, proceso que se repite tres veces. De este modo se han fabricado diversas muestras en forma de plancha circular de 30 cm de diámetro y 1.5 cm de espesor. La figura 1 muestra la imagen de una de las muestras fabricadas, en la que se puede apreciar un detalle de la distribución de los elementos quirales.

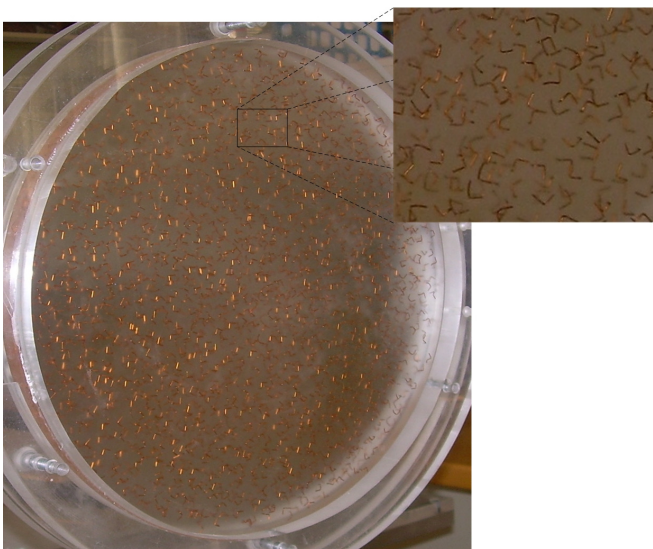


Fig. 1. Imagen de una muestra colocada en el sistema de medida en medio libre e imagen ampliada donde se aprecia los elementos quirales en forma de manivelas.

Han sido diseñadas y analizadas para este trabajo dos estructuras construidas a partir del hilo conductor de cobre,

de igual longitud total del elemento individual (manivela), pero con segmentos de distinto tamaño. La Tabla 1 muestra las dimensiones y un esquema de los elementos utilizados, así la muestra ML7 está compuesta por manivelas con los tres segmentos de idéntico tamaño y en la muestra ML10 el segmento central es de menor longitud.

La concentración de manivelas resultante es de 2 cm^{-3} , que resulta ser bastante inferior a la concentración que se puede lograr si se utilizan hélices de la misma longitud como elemento quiral individual. Para comparar, con un hilo de 20 mm de longitud en forma de hélice se logran concentraciones de entre 25 y 100 hélices por cm^{-3} [6], si bien en este último caso se puede apreciar gran número de contactos entre ellas.

III. RESULTADOS

El sistema experimental utilizado es el descrito en [6] y utilizado en [7] en la caracterización de elementos quirales fabricados con hélices. Consta de dos antenas en banda X, un espejo elipsoidal de 30x16 cm para focalización del haz y evitar efectos de difracción en bordes. La antena emisora está situada en un foco del espejo, el cual produce un haz focalizado de unos 6 cm de diámetro, y la muestra se sitúa en el camino del haz. La antena receptora puede girar alrededor de su eje longitudinal, permitiendo medidas de cualquier polarización de la onda transmitida por la muestra. El sistema es conectado a un analizador de redes Agilent de dos puertos que permite la determinación de los parámetros S.

Los medios quirales producen en su interior un cambio de polarización en la onda electromagnética que los atraviesa de forma que, para una polarización incidente lineal, la onda transmitida presenta polarización elíptica con una rotación respecto al ángulo de polarización incidente. La magnitud y sentido del giro depende de la frecuencia y de las características del medio. El sistema de medida permite la determinación de los cuatro parámetros S para cualquier polarización de la onda transmitida y, por tanto, es posible obtener la elipticidad, el ángulo de rotación de la polarización y los parámetros constitutivos del material: permitividad eléctrica ϵ , permeabilidad magnética μ y quiralidad κ [7].

El ángulo de rotación queda determinado directamente al girar la antena receptora hasta encontrar el valor mínimo (o máximo) de la señal transmitida por la muestra. Debido a la concentración del haz producido por el espejo, los resultados obtenidos dependen de la zona de la muestra sobre la que incide la onda. Un haz de 6 cm de diámetro incide sobre una zona de muestra con 40 manivelas aproximadamente.

ML7	ML10
$L_T = 12.6 \text{ mm}$ $4.2 \times 4.2 \times 4.2$	$L_T = 12.6 \text{ mm}$ $5.5 \times 1.6 \times 5.5$

Tabla 1. Elementos quirales utilizados en la fabricación de las muestras.

Las figuras 2 y 3 muestran el ángulo de rotación producido por las muestras ML7 y ML10, respectivamente, cuando el haz incide en zonas distintas de cada muestra. También se indica la media aritmética de las diferentes medidas para cada muestra. Se puede observar que ambas muestras producen una rotación en sentido negativo en la zona baja de la banda y en sentido positivo en la zona alta. El cambio en el sentido de giro se sitúa ligeramente por encima de 8 GHz para ML7 y ligeramente por debajo de esa frecuencia para la muestra ML10. En ambos casos, en la región de rotación positiva del plano de polarización se observa un decaimiento del ángulo de giro, que se mantiene sin cambios de signo.

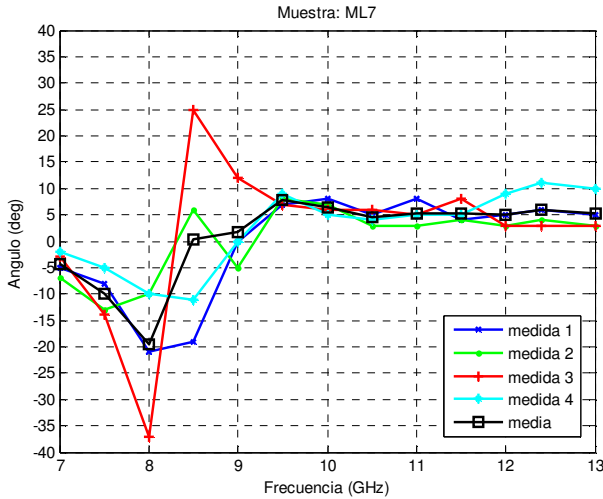


Fig. 2. Rotación de una onda TEM producida por cuatro zonas distintas de la muestra ML7 y media aritmética de las cuatro medidas.

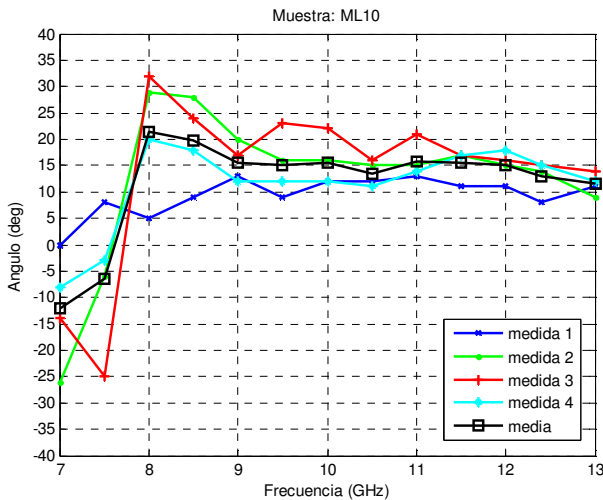


Fig. 3. Rotación de una onda TEM producida por cuatro zonas distintas de la muestra ML10 y media aritmética de las cuatro medidas.

IV. DISCUSIÓN

Un análisis detallado de la respuesta de los materiales aquí presentados requiere, entre otros aspectos, del cálculo de sus parámetros constitutivos y de comparaciones con modelos teóricos y con otros medios quirales conocidos. Nosotros, en una primera aproximación, describiremos cualitativamente el comportamiento encontrado y procederemos a estudiar si concuerda con el esperado en un medio quiral. Desde un punto de vista teórico, un medio

quiral presenta una permitividad y permeabilidad que se pueden modelar utilizando un modelo resonante de Lorentz:

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega_{0e}^2}{\omega_{0e}^2 - \omega^2 + 2j\omega_{0e}\xi_e\omega} \quad (1)$$

$$\mu_r(\omega) = \mu_\infty + \frac{(\mu_s - \mu_\infty)\omega_{0m}^2}{\omega_{0m}^2 - \omega^2 + 2j\omega_{0m}\xi_m\omega} \quad (2)$$

Mientras que para el parámetro de quiralidad se ha sugerido un modelo de Condon [11]:

$$\kappa(\omega) = \frac{\tau\omega_0^2\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + j2\omega_0\xi\omega} \quad (3)$$

donde τ es una constante de tiempo, ω_0 la frecuencia de resonancia y ξ el factor de amortiguamiento o absorción. Este último término hace que la quiralidad sea un número complejo:

$$\kappa(\omega) = \kappa'(\omega) - j\kappa''(\omega) \quad (4)$$

La parte real, κ' , es la responsable de la rotación, y se puede relacionar con el ángulo determinado experimentalmente mediante la expresión [12]:

$$\theta = 2d\omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\kappa' \quad (5)$$

siendo d el grosor de la muestra analizada.

La parte imaginaria implica un factor de pérdidas, cuyo valor presenta un máximo en la zona de resonancia.

El análisis de las figuras 2 y 3 muestra un ángulo de rotación compatible con una quiralidad que sigue un modelo de Condon (3), con una frecuencia de resonancia en torno a 8 GHz.

A baja frecuencia, la muestra ML7, formada por manivelas con los tres segmentos idénticos, produce una rotación hacia ángulos negativos (lo que indica rotación hacia la izquierda), cuyo valor aumenta con la frecuencia hasta alcanzar un valor máximo de aproximadamente -20° a unos 8 GHz. Al aumentar la frecuencia se produce un cambio brusco en el sentido del giro de rotación, pasando a valores positivos entorno a los 9 GHz (indicando rotación hacia la derecha). Para frecuencias superiores la rotación producida disminuye con la frecuencia lentamente hasta alcanzar un valor de $\sim 5^\circ$ grados a 13 GHz. Se han realizado medidas en banda Ku y encontrado que el ángulo de rotación se hace nulo a ~ 17 GHz.

El comportamiento de ML10 es similar al obtenido para la muestra ML7, con algunas diferencias. Además del ya mencionado cambio en el sentido de rotación a frecuencias ligeramente inferiores, la rotación del plano de polarización producido es superior para ML10. Se puede apreciar que entre 9 y 13 GHz el ángulo de giro es aproximadamente el doble al logrado para la muestra ML7.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolla una técnica de fabricación de materiales quirales diseñados mediante la inclusión en un dieléctrico de estructuras metálicas quirales en forma de manivela. La medida del ángulo de rotación de una señal

linealmente polarizada muestra una actividad electromagnética indudable, a pesar de la dispersión en los resultados. Esta dispersión está asociada a la falta de homogeneidad conseguida en el proceso de fabricación, que requiere de una mayor optimización.

Se ha encontrado que el ángulo de rotación del plano de polarización presenta diferente sentido según la frecuencia de la onda incidente, lo que es compatible con los modelos teóricos comúnmente aceptados y con resultados experimentales observados en medios quirales basados en hélices. A falta de determinar experimentalmente el factor $(\epsilon_r \mu_r)^{1/2}$ del material, la frecuencia observada en torno a 8 GHz es compatible con una resonancia en $\lambda/2$ producida por los elementos quirales de 12.6 mm en un medio de permitividad relativa 2. Además, parece ser que el tamaño de los segmentos que constituyen el elemento quiral individual no parece afectar en gran medida a la frecuencia de resonancia, no hemos encontrado diferencias apreciables entre las dos estructuras analizadas, si bien es necesario llevar a cabo un estudio con una mayor variedad de elementos y con muestras más homogéneas para constatar esta afirmación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General de Investigación del MEC a través del proyecto CYCIT TEC 2006-13268-C03-02

REFERENCIAS

- [1] L. Pasteur, "Sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le sens de la polarisation rotatoire", *Ann. de Chim. et Phy.*, vol. 24, pp. 442–459, 1848.
- [2] K. F. Lindman, "Über eine durch ein isotropes system von spiralformigen resonatoren erzeugte rotationspolarisation der elektromagnetischen wellen", *Annalen der Physik.*, vol. 63, pp. 621–644, 1920.
- [3] K. F. Lindman, "Über die durch ein aktives raumgitter erzeugte rotationspolarisation der elektromagnetischen wellen", *Ann. d. Physik.*, vol. 69, pp. 270–284, 1922.
- [4] R. Ro, V.V. Varadan, V.K. Varadan, "Electromagnetic activity and absorption in microwave composites", *IEE Proc.-H*, vol. 139, nº 5, pp. 441–448, Oct. 1992.
- [5] G. Busse, J. Reinert, A. F. Jacob, "Waveguide characterization of chiral material. Experiment" *IEEE-MTT*, vol 47, No 3, 1999.
- [6] J. Margineda et al., "Sistema experimental en medio libre para caracterización electromagnética de medios quirales" XVIII Simposium Nacional URSI, La Coruña, 2003.
- [7] G. J. Molina-Cuberos et al., "Caracterización electromagnética de medios quirales artificiales mediante técnica de onda libre", XX Simposium Nacional URSI, Gandia, 2005.
- [8] J. H. Cloete, M. Bingle y D. B. Davidson, "Scattering and Absorption by Thin Metal Wires in Rectangular Waveguide-Chiral Cranks versus Non Chiral Staples", *Proc. 8th International Conference on Electromagnetics of Complex Media*, pp353-358, Lisbon, 2000.
- [9] A. J. García-Collado et al., "Estudio Experimental de inserciones metálicas quirales en medios guiados", XXII Simposium Nacional URSI, Tenerife, 2007.
- [10] J. Margineda et al., "Avances en el diseño, caracterización y modelado de medios quirales para frecuencias de microondas" V Encuentro Ibérico de Electromagnetismo Computacional, Aiguablava, 2007.
- [11] E. U. Condon, "Theories of Optical Rotatory Power", *Rev. of Modern Phys.*, vol. 9, 432–457, 1937.
- [12] I. V. Lindell, A. H. Shivola, S. A. Tretyakov, A. J. Viitanen, "Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-isotropic Media", *Artech House*, 1994.