

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE MEDIOS QUIRALES BASADOS EN INCLUSIONES PERIÓDICAS. EL RESONADOR DE CUATRO MANIVELAS

Angel J. García Collado,^(1,2) Gregorio J. Molina-Cuberos,⁽¹⁾ María J. Núñez,⁽¹⁾ José Margineda⁽¹⁾
 ajgarcia@pdi.ucam.edu, gregomc@um.es, maripepa@um.es, jmargi@um.es.

⁽¹⁾Grupo Electromagnetismo, Universidad de Murcia, Campus Espinardo, E-30100, Murcia.

⁽²⁾Departamento Ciencias Politécnicas, Universidad Católica San Antonio, E-30107, Guadalupe, Murcia.

Resumen—The periodical distribution of elements forming a bi- or three-dimensional periodical lattice has provided a fundamental tool to develop new materials with exotic and, sometimes, amazing electromagnetic properties. Here we have analyzed the effects related to the electromagnetic activity produced by a 2D array of four crank resonators (4CR), which is composed by same handedness cranks in a packed configuration forming a parallelepiped. The sample has been built using printed circuit technology and the unit cell was designed to fit its electromagnetic response into the X band frequency range. Using a free-wave system and the corresponding reciprocal algorithms, we have characterized the material and determined the rotation angle, refraction index and chirality parameter.

I. INTRODUCCIÓN

La técnica más utilizada para implementar medios capaces de rotar el plano de polarización de una onda electromagnética ha sido la distribución aleatoria de elementos con simetría quiral en un medio dieléctrico [1]. Sin embargo esta técnica muestra algunas carencias asociadas a la falta de homogeneidad, dificultad de fabricación y alto coste [2]. En los últimos años se han propuesto técnicas alternativas de fabricación con el objetivo de solventar algunos de estos problemas y de proporcionar nuevos parámetros que permitan controlar y aumentar los efectos producidos. Entre las nuevas técnicas destaca la implementación de redes bidimensionales de estructuras con simetría quiral sobre placas de circuito impreso [3].

Basándose en esta tecnología, Barba et al. [4] diseñaron una célula unidad formada por ocho manivelas dibujadas sobre las dos caras de un circuito impreso y conectando los segmentos mediante vías. Repitiendo la estructura se puede formar una distribución periódica bidimensional y si se apilan varias láminas se pueden conseguir rotaciones en la polarización superiores a 360°.

Posteriormente, Molina-Cuberos et al. [5] presentaron una estructura también basada en manivelas, pero con distinta distribución, el resonador de cuatro manivelas (4CR, *four cranks resonator*). La celda unidad está constituida por cuatro unidades empaquetadas, todas con la misma simetría, formando un paralelepípedo que tiene la ventaja añadida de presentar una mayor densidad de manivelas por unidad de volumen.

En este trabajo hemos tomado el resonador de cuatro manivelas como celda unidad para construir una red bidi-

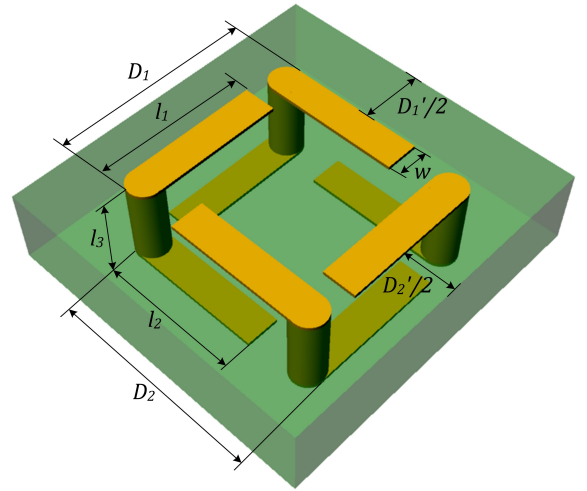


Fig. 1. Esquema del resonador de cuatro manivelas.

dimensional con el objetivo de estudiar los efectos producidos sobre una onda linealmente polarizada. Cada manivela tiene orientación levógira y está formada por tres segmentos de $l_1 = l_2 = 3,5$ mm, $l_3 = 2,4$ mm de longitud y $w = 0,6$ mm de grosor. La separación entre los resonadores es $D_1 = D_2 = 4,5$ mm y las distancias entre dos celdas son $D_1' = D_2' = 9,0$ mm, ver Fig. 1. Las medidas realizadas nos permiten caracterizar el medio y calcular, entre otros, el índice de refracción, la quiralidad y las constantes de propagación.

II. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

El comportamiento macroscópico de los medios quirales se puede describir mediante sus relaciones constitutivas [6]:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \vec{E} - j\kappa \vec{H} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} + j\kappa \vec{E} \end{aligned} \quad (1)$$

donde ϵ y μ son la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética, respectivamente. El acoplamiento de los campos eléctricos y magnéticos característico de los medios quirales queda descrito mediante el parámetro de quiralidad, κ .

En general, la propagación de una onda plana linealmente polarizada se puede describir como la suma de dos ondas con

polarización circular, una a derechas y otra a izquierdas. En el caso particular de los medios quirales esta descomposición facilita su tratamiento, ya que cada una de las ondas circulares se propaga cumpliendo relaciones constitutivas desacopladas [7], sin parámetro de quiralidad. Cada uno de los dos modos de propagación, a derechas e izquierdas, se propaga en el medio como si de un medio isótropo se tratase, con índice de refracción y número de onda, en general, distinto para cada modo. La quiralidad relativa del material, determinada por $\kappa_r = \kappa/\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$, es el parámetro físico que los diferencia. Los índices de refracción y los números de onda para los modos a derechas e izquierdas, notados respectivamente + y - son:

$$n_{\pm} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r}(1 \pm \kappa_r) = n(1 \pm \kappa_r) = n \pm \kappa \quad (2)$$

$$k_{\pm} = \frac{\omega}{c}\sqrt{\epsilon_r\mu_r}(1 \pm \kappa_r) = k_0n(1 \pm \kappa_r) \quad (3)$$

donde hemos definido el índice de refracción del medio como $n = \sqrt{\epsilon_r\mu_r}$.

El hecho de que se propagen dos ondas con velocidades de propagación distintas produce dos efectos comprobables experimentalmente: la dirección de polarización de la señal resultante, suma de ambos modos, rota conforme la onda se propaga en el material, fenómeno conocido como *dispersión óptica rotatoria*; y la absorción de cada modo es distinta, lo que genera un cambio en la polarización, pasando de lineal a elíptica, fenómeno conocido como *dicroísmo circular*.

Estos cambios en la polarización de la onda hacen que para determinar experimentalmente la propagación no baste con medir los coeficientes usuales de reflexión y transmisión. Además es necesario realizar medidas adicionales que proporcionen el ángulo de rotación de la señal y su fase. Como magnitud adicional hemos medido el coeficiente de transmisión en la dirección perpendicular a la señal incidente, que denominamos T_{CR} , que junto a los usuales coeficientes de reflexión R y transmisión T_{CO} proporcionan tres magnitudes experimentales que permitirán determinar los tres parámetros constitutivos del material ϵ , μ y κ , y consecuentemente las constantes de propagación de los modos (k_+ y k_-) y el índice de refracción (n). Para ello, hemos utilizado el algoritmo desarrollado en nuestro grupo de investigación [8], que ha sido mejorado recientemente y que también se presenta en el Congreso de URSI 2011 [9].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 2 muestra la magnitud de los coeficientes R , T_{CO} y T_{CR} determinados experimentalmente y la absorción de energía. Se observa que alrededor de los 11 GHz todos los parámetros alcanzan un extremo. El mínimo de T_{CO} (a 11.02 GHz) y el máximo de T_{CR} (11.00 GHz) implican que se produce un cambio en el estado de polarización de la señal, pasando de lineal a elíptica y/o una rotación en el plano de polarización. Para discernir ambos efectos es necesario tener en cuenta su diferencia de fase. El coeficiente de reflexión cambia con la frecuencia siguiendo una pauta similar al observado en T_{CO} , alcanzando un mínimo en 10.92 GHz. La parte inferior de la Fig. 2 presenta la absorción de energía, donde se observa que las mayores pérdidas ocurren alrededor de los 11 GHz y son aproximadamente el 50%. La absorción detectada es muy inferior a las observadas en otros materiales quirales formados por distribuciones aleatorias de hélices

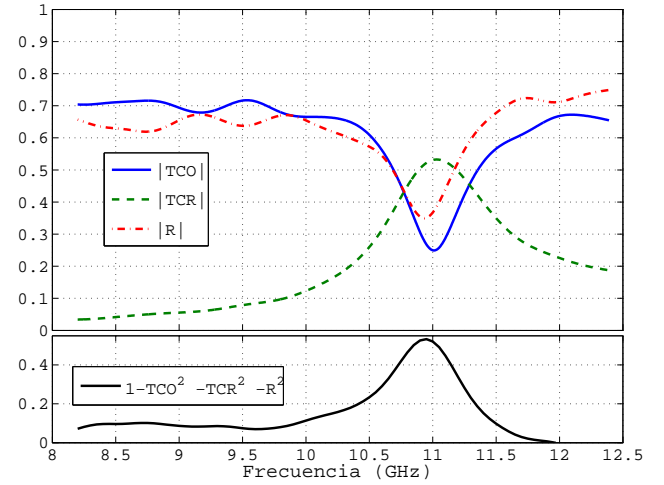


Fig. 2. Módulo de los coeficientes R , T_{CO} y T_{CR} y absorción energética.

[8], manivelas [10] o distribuciones ordenadas de manivelas metálicas sobre foam [2].

A partir de los coeficientes de transmisión y reflexión también se puede conocer la elipse de polarización de la señal transmitida, es decir, los ejes mayor y menor y el ángulo de rotación [11]. Las Fig. 3, 4 muestran el ángulo de rotación y los ejes mayor y menor. Se puede apreciar que el medio produce una rotación de la polarización hacia valores negativos (levógira) a frecuencias menores de 11 GHz y hacia valores positivos (dextrógira) por encima de esta frecuencia. El cambio en el sentido de rotación coincide con la frecuencia de resonancia mostrada en la Fig. 2. Simulaciones realizadas con CST [5], permiten estudiar el comportamiento a frecuencias fuera de la banda experimental, observándose que el ángulo de rotación alcanza un valor máximo de unos -170° , lo que es equivalente al giro de 10° mostrado en la Fig. 3, ya que existe una incertidumbre de valor π en el sistema de medida. Este máximo no es abrupto, sino que permanece casi constante durante varios gigahertzios.

Conocidos los parámetros de la elipse de polarización, se puede dibujar dicha elipse. Se ha representado en la Fig. 5 la señal transmitida para nueve frecuencias escogidas. En esta representación la señal incidente tendría dirección vertical (punteada en color rojo). Por debajo de unos ~ 10 GHz, se transmite una señal con polarización prácticamente lineal. Conforme la frecuencia aumenta, la polarización pasa de lineal a elíptica. A 11.00 GHz ha rotado un ángulo de 86° respecto a la onda incidente, pudiéndose apreciar que la polarización es claramente elíptica. Conforme aumenta la frecuencia sigue aumentando el ángulo de giro y la señal va recobrando su carácter lineal.

La Fig. 6 muestra la parte real e imaginaria del índice de refracción. La parte imaginaria alcanza un extremo en 10.97 GHz, indicando un máximo en la absorción lo que concuerda con lo mostrado en la figura inferior de Fig. 2. Se observa que la parte real tiene un signo negativo en una estrecha banda justo por encima de la frecuencia de resonancia, lo que concuerda con las pérdidas mostradas en la Fig. 2. La Fig. 6 también muestra la parte real e imaginaria del parámetro de quiralidad. Se puede observar que tanto las partes real e imaginaria siguen una pauta similar a la

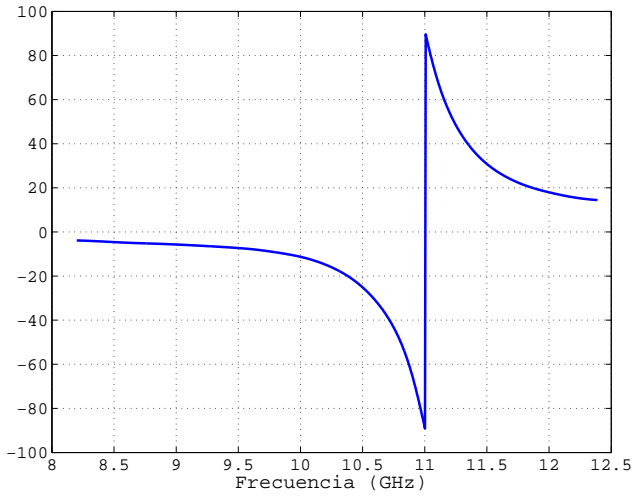


Fig. 3. Ángulo de rotación.

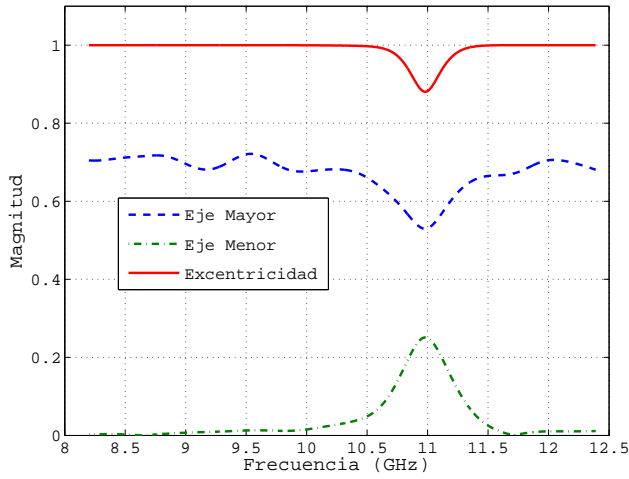


Fig. 4. Ejes menor (b) y mayor (a) y excentricidad ($\sqrt{a^2 - b^2}/a$) de la elipse de polarización de la señal transmitida.

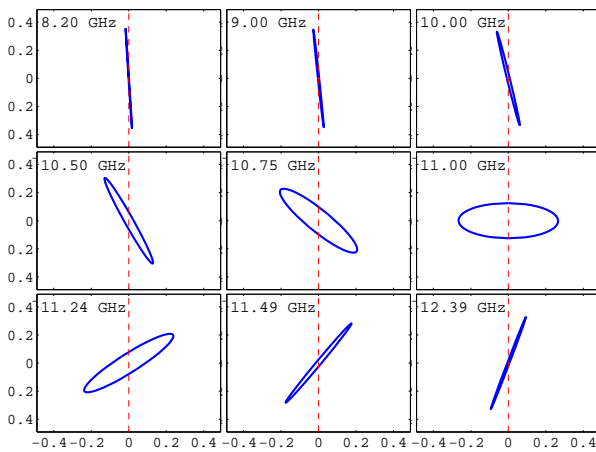


Fig. 5. Elipse de polarización de la señal transmitida a distintas frecuencias (línea azul continua) y onda incidente (línea roja discontinua).

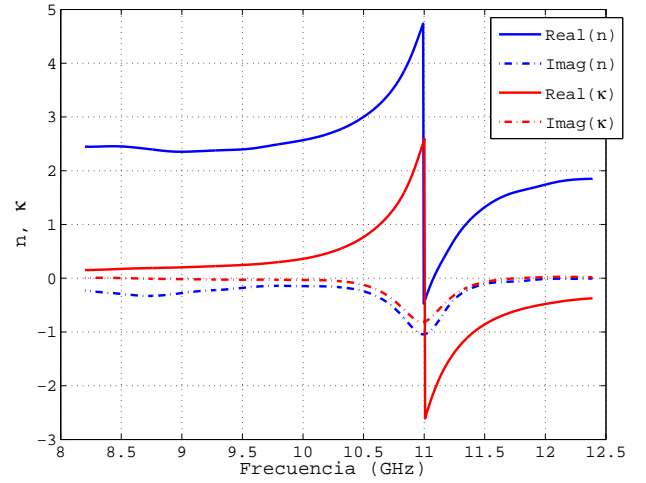


Fig. 6. Partes real e imaginaria del índice de refracción y quiralidad.

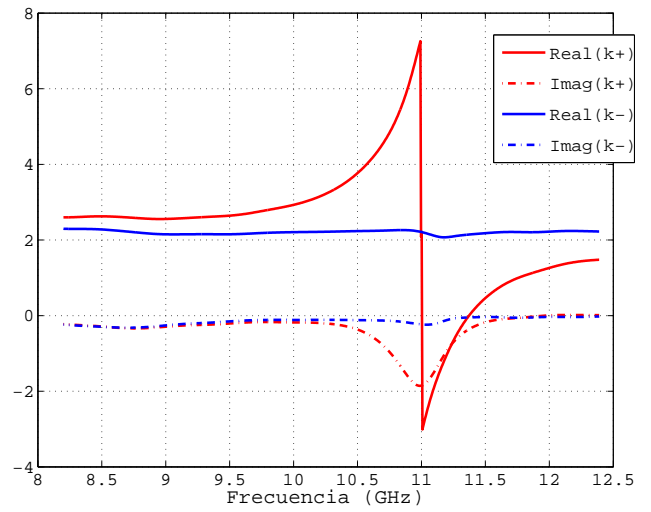


Fig. 7. Partes real e imaginaria del número de onda de modo de propagación.

encontrada en el índice de refracción. Este hecho ha sido encontrado en otros diseños de materiales quirales basados en PCB [12]. Si comparamos la magnitud de κ con la encontrada en medios quirales basados en una distribución aleatoria de hélices [8], encontramos que estos últimos presentan una quiralidad un orden de magnitud menor y, además, un mayor nivel de pérdidas.

Conocidos n y κ , se puede determinar el número de onda de los modos de propagación, k_+ y k_- , mostrados en la Fig. 7 se observa que el modo de propagación de la onda circularmente polarizada a izquierdas presenta un valor prácticamente constante en toda la banda de frecuencias, $k_- = (2,15 \pm 0,1) + (-0,5 \pm 0,5)j$, con una parte imaginaria prácticamente nula con variaciones dentro de los límites de sensibilidad del sistema de medida. Por el contrario, k_+ muestra una dependencia con la frecuencia similar a la mostrada por n y κ , incluyendo un valor negativo entre 11.0 GHz y 11.4 GHz. El valor negativo se debe a que en la resonancia el valor de la quiralidad es bastante alto. La onda a derechas presenta una atenuación, parte imaginaria negativa, en la misma banda de frecuencias encontrada en n y κ , lo que conlleva una mayor atenuación de este modo y por tanto la

onda transmitida presenta polarización elíptica a izquierdas.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la caracterización experimental de un material formado por una red bidimensional cuya célula unidad está compuesta por cuatro manivelas idénticas dispuestas en forma de paralelepípedo. El uso de tecnología basada en circuito impreso ha permitido disminuir la absorción de energía en toda la banda, especialmente a la frecuencia de resonancia situada entorno a 11 GHz, respecto a la absorción encontrada en materiales fabricados usando otras técnicas. Se ha determinado la polarización de la señal transmitida y confirmado, mediante el cálculo de los parámetros de la elipse de polarización, que el medio presenta las propiedades de dicroísmo y dispersión rotatoria típica en los materiales con actividad electromagnética. Los números de onda asociados a los modos de propagación en el material han sido calculados encontrando que en la banda de resonancia se produce una fuerte absorción en la onda con polarización a izquierdas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto TEC 2010-21496-C03-02.

REFERENCIAS

- [1] C.R. Brewitt-Taylor, P.G. Lederer, F.C. Smith and S. Haq, "Measurements and predictions of helix-loaded chiral composites" *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, pp. 692-700, 1999.
- [2] A.J. García-Collado, G.J. Molina-Cuberos, J. Margineda, M.J. Nuñez, and E. Martín, "Isotropic and Homogeneous Behaviour of Chiral Media Based on Periodical Inclusions of Cranks" *IEEE Microwave and Wireless Components Let.*, vol. 20, pp. 175-177, 2010.
- [3] I. Barba, A.C.L. Cabeceira, A.J. García-Collado, G.J. Molina-Cuberos, J. Margineda and J. Represa, "Quasiplanar Chiral materials for microwave frequencies" in *Electromagnetic Waves / Book 2*, InTech - Open Access Publisher, 2011.
- [4] I. Barba, A.C.L. Cabeceira, A. Gómez and J. Represa, "Chiral Media Based on Printed Circuit Board Technology: A Numerical Time-Domain Approach" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 1170-1173, 2009.
- [5] G.J. Molina-Cuberos, A.J. García-Collado, I. Barba, A.C.L. Cabeceira, J. Represa and J. Margineda, "Chiral media based on periodic distribution of cranks. The four cranks resonator" enviado a *Metamaterials* abril 2011.
- [6] I.V. Lindell, A.H. Sihvola, S.A. Tretyakov, and A.J. Vitanen, *Electro-magnetic Waves in Chiral Media*, Boston, USA: Artech House, 1994.
- [7] C.F. Bohren, "Light scattering by an optically active sphere" *Chemical Physics Letters*, vol. 29, pp. 458-462, 1974
- [8] G.J. Molina-Cuberos, J. Margineda and M.J. Nuñez, "Caracterización electromagnética de medios quirales artificiales mediante técnica de onda libre" Congreso Nacional de la URSI, Universidad Politécnica de Valencia, 2005.
- [9] F.J. Sánchez López, A.J. García-Collado, G.J. Molina-Cuberos, and M.J. Nuñez, "Algoritmo para la caracterización unívoca de metamateriales basados en inclusiones quirales" enviado al Congreso Nacional de la URSI, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2011.
- [10] G.J. Molina-Cuberos, A.J. García-Collado, J. Margineda, M.J. Nuñez, and E. Martín, "Electromagnetic Activity of Chiral Media Based on Crank Inclusions" *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol 19, pp. 278-280, 2009.
- [11] C.A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1999.
- [12] B. Wang, J. Zhou, M. Kafesaki, Th. Koschny and C. M. Soukoulis, "Chiral metamaterials: Simulations and experiments" *J. Opt. A: Pure and Appl. Optics* 11, 114003, 2009.