

DISEÑO DE MEDIOS QUIRALES BASADOS EN ESTRUCTURAS INDIVIDUALES BIDIMENSIONALES

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

Ernesto Martín⁽²⁾, María J. Núñez⁽²⁾

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

⁽¹⁾ Dpto. de Ciencias Politécnicas, Universidad Católica San Antonio, Murcia, España

⁽²⁾ Dpto. de Física, Facultad de Químicas, Universidad de Murcia, Murcia, España

Abstract- In this paper, we present a new way of constructing chiral media, in 8.2-12.4 GHz band, starting from achiral individual metallic elements (right angle). We showed that an appropriate distribution of such inclusions in a dielectric host responds in a manner consistent to that obtained with other media constructed using chiral metal inclusions. Appropriately modifying the size and spatial distribution of right angles is possible to model the response of these media. The media manufactured by the inclusion of right angles can be fabricated using technology printed circuit board (PCB).

I. INTRODUCCIÓN

Algunos medios presentan la propiedad de hacer girar el plano de polarización de un haz incidente linealmente polarizado, a este fenómeno se le denomina *actividad óptica*. Los medios que presentan actividad óptica son denominados *medios quirales*.

El concepto *quiral* es debido a Lord Kelvin [1]: un objeto, figura o grupo de puntos son quirales, y por tanto presentan quiralidad, si la imagen especular de los mismos no se puede hacer coincidir consigo misma mediante operaciones de traslación y rotación. Es decir, dicho objeto carece de simetría bilateral o es asimétricamente especular. Por el contrario, el objeto, figura o grupo de puntos será aquiral cuando carezca de la propiedad de quiralidad. Un objeto con simetría quiral es intrínsecamente tridimensional.

La quiralidad es una propiedad de un objeto completo y no de un átomo particular. Geométricamente, una estructura quiral es dextrógira cuando produce una rotación hacia la derecha de una onda incidente y levógira cuando la presenta hacia la izquierda en su sentido de avance.

A frecuencias de microondas la actividad óptica pasa a ser denominada *actividad electromagnética* y los medios que la presentan se denominan genéricamente como medios electromagnéticos complejos.

El primer medio con actividad electromagnética para frecuencias en torno a 1-3 GHz fue realizado por Lindman [2]-[3], fabricado mediante hélices formadas por hilos de

cobre orientadas aleatoriamente. La técnica más usual de fabricación de medios quirales 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 construidos producen un giro en el plano de polarización de una onda electromagnética linealmente polarizada. El tamaño de las estructuras quirales individuales determina la banda de frecuencias donde aparecen las propiedades características de estos medios.

Mediante técnicas de medida en espacio libre se ha demostrado que estos composites hacen girar el ángulo de polarización de una onda linealmente polarizada [4]-[5], pudiéndose además caracterizar el material mediante la determinación experimental de su permitividad, su permeabilidad y su quiralidad [6].

Otros trabajos han introducido otros tipos de inclusiones [7]-[9]. En éstos, el análisis de las propiedades electromagnéticas indica que las inclusiones insertadas en el medio dieléctrico deben de ser pequeñas en comparación con la longitud de onda, es decir, deben ser eléctricamente pequeñas.

Cloete et al. [10] propusieron, por primera vez, inclusiones metálicas fabricadas a partir de un hilo conductor doblado en tres segmentos, denominado crank (Fig. 1.a) y determinaron que la absorción de una onda electromagnética era un fenómeno asociado a resonancia independientemente de la existencia de la quiralidad.

Molina-Cuberos et al. [11] utilizando este tipo de inclusiones distribuidas en un material dieléctrico homogéneo (resina epoxy), de manera similar a la utilizada en medios basados en hélices, comprobaron de forma experimental que estos materiales también presentan actividad electromagnética. Con el objetivo de conseguir un material homogéneo, los elementos se distribuyen aleatoriamente por la superficie y en todas las direcciones del espacio, manteniendo especial cuidado en lograr una distribución sin orientaciones ni posiciones privilegiadas. Las propiedades mecánicas de la resina dieléctrica permiten cualquier orientación de los elementos quirales.

Esta técnica de fabricación presenta algunos inconvenientes, que quedan solventados mediante la disposición ordenada de elementos crank sobre la superficie dieléctrica [12], lo que permite un diseño muy eficiente de este tipo de materiales.

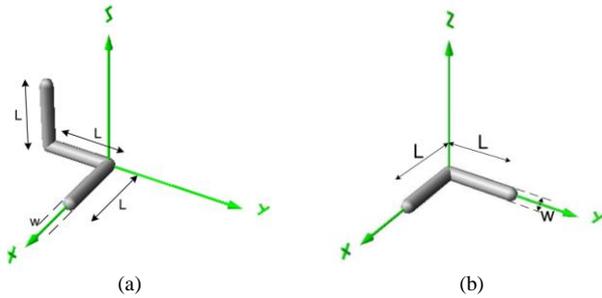


Fig. 1. (a) Estructura tridimensional de un elemento crank, (b) estructura right angle empleada en la construcción de medios.

En todos los casos, las inclusiones metálicas son elementos que presentan individualmente características de quiralidad atendiendo a la definición de Kelvin. Rogacheva et al. [13] proponen estructuras metálicas individuales bidimensionales e inherentemente aquirales que dispuestas espacialmente sobre dos capas paralelas permiten obtener medios con actividad electromagnética.

Partiendo de esta propuesta, se ha llevado a cabo la fabricación de medios complejos mediante la inserción de elementos bidimensionales right angle (Fig. 1.b). Un right angle es una estructura metálica constituida por un segmento metálico de longitud $2L$ y anchura w doblado en ángulo recto por su mitad.

II. DESCRIPCIÓN DE LOS MEDIOS

En este trabajo se analizan tres estructuras de interés: medio M1 (ángulos rectos ordenados), medio M2 (ángulos rectos en cruz) y medio M3 (ángulos rectos ordenados en bicapa), que esquemáticamente se muestran en la Figura 2.

La distribución M1 está constituida por ángulos ordenados y dispuestos sobre el material dieléctrico en idéntica orientación; la distancia entre dos ángulos rectos consecutivos es de 7 mm, con $L = 7.5$ mm y $w = 0.05$ mm (Fig. 2.a). La distribución M2 está constituida por agrupaciones repetitivas de cuatro ángulos, cada uno rotado 90° respecto de su vecino, constituyendo celdas de cuatro elementos que se repiten de forma periódica en todo el medio (Fig. 2.b). La distancia entre dos ángulos rectos consecutivos es de 7 mm, con $L = 7.5$ mm y $w = 0.05$ mm. Por último, la distribución M3 está constituida por dos capas de ángulos con distribución espacial similar a la del medio M2, cada una de ellas dispuesta por una de las caras de una lámina de material dieléctrico. Es una composición a dos capas, similar a las propuestas por otros autores [13], en la que se han realizado modificaciones para lograr mayor flexibilidad en el análisis de sus parámetros geométricos. En una de las caras se rotan los ángulos individualmente un ángulo φ respecto del elemento dispuesto en la cara opuesta del dieléctrico. Para la distribución M3 la distancia entre dos ángulos consecutivos de la misma cara es de 7 mm, con $L = 6.0$ mm y $w = 0.05$ mm (Fig. 2.c).

Las estructuras elementales en forma de ángulo permiten la implementación de medios sobre circuito impreso, lo que facilita el proceso de fabricación y la calidad del acabado, si bien, para este trabajo, y a fin de flexibilizar el proceso experimental, se ha optado por la fabricación individual de los elementos y su inserción en una lámina de espuma de poliuretano (constante dieléctrica ~ 1) de 5 mm de grosor.

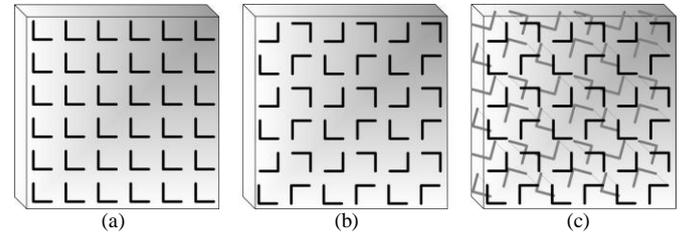


Fig. 2. Esquema de los medios analizados: (a) medio M1, (b) medio M2 y (c) medio M3.

Para todos los medios expuestos se ha determinado experimentalmente el ángulo de rotación producido sobre una onda linealmente polarizada en banda X.

III. SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema experimental consta de dos antenas de bocina en banda X, un espejo elipsoidal de 30x16 cm para focalización del haz y evitar efectos de difracción en bordes y un bastidor donde situar los medios [4]. La antena emisora está situada en un foco del espejo, que produce un haz focalizado de unos 6 cm de diámetro. La antena receptora puede girar alrededor de su eje longitudinal, permitiendo medidas de cualquier polarización de la onda que atraviesa el medio. El sistema se conecta a un analizador de redes de dos puertos que permite la determinación de los parámetros de scattering 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 [5].

Una vez dispuesto y calibrado adecuadamente todo el dispositivo de medida mediante el modelo TLR, se gira de forma manual en incrementos de 5° el tramo de guía que permite el giro de la antena receptora, midiendo y almacenando el parámetro S_{21} para todas las frecuencias de la banda de estudio. Se barre un rango de 90° en ambos sentidos de giro, partiendo de la situación inicial en la que ambas bocinas se encuentran alineadas. Por convenio aceptamos que el giro de la estructura a la derecha tenga valores positivos de ángulo de giro y se asignan valores negativos al giro a la izquierda. El ángulo de rotación de la onda que atraviesa el medio queda se puede relacionar con los parámetros que caracterizan al material mediante la expresión [6]:

$$\theta = 2d\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\kappa' \quad (1)$$

donde d es la distancia recorrida por la onda en el medio, y κ' (parte real de la quiralidad, $\kappa(\omega) = \kappa'(\omega) - j\kappa''(\omega)$) es la responsable de la rotación. La parte imaginaria implica un factor de pérdidas cuyo valor presenta un máximo en la zona de resonancia.

Con objeto de eliminar las posibles reflexiones no deseadas que puedan tener lugar en el dispositivo experimental, se ha llevado a cabo un tratamiento en el dominio del tiempo de las medidas realizadas. Mediante la transformación tiempo-frecuencia y un eventanado adecuado la señal recibida en la antena receptora está libre de posibles efectos espúreos que puedan modificar la interpretación de los resultados logrados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el medio M1 (Fig. 2.a) la distribución de las componentes del campo se adapta a las estructuras metálicas produciendo una rotación de $\sim 45^\circ$ hacia la izquierda en el sentido de su desplazamiento (Fig. 3, inf.). Si el medio M1 es rotado sobre su eje longitudinal 90° se observa el mismo efecto, pero debido a la diferente distribución de los elementos metálicos, el giro de $\sim 45^\circ$ tiene lugar hacia la derecha en el sentido de avance de la onda (Fig. 3, sup.), a la misma frecuencia de resonancia. Una rotación del medio M1 de 180° no implica cambios en los datos experimentales respecto de la situación de partida.

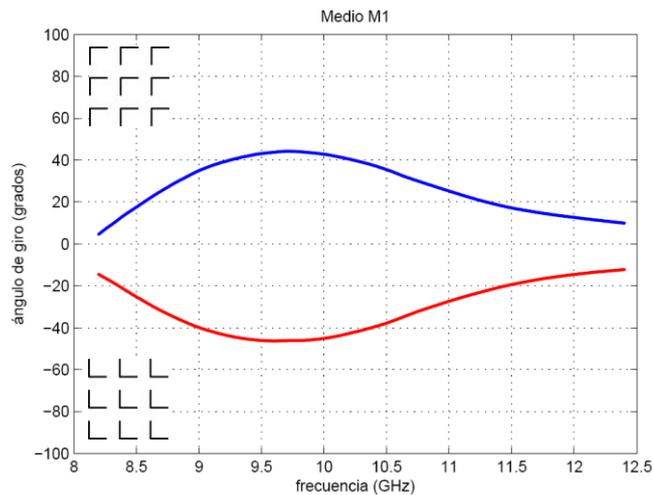


Fig. 3. Giro obtenido para M1. La curva de color azul se corresponde con la disposición de los right angles según se indica en el croquis superior. La curva roja se corresponde con la disposición de los right angles según se indica en el croquis inferior.

Como se puede observar, este tipo de estructuras produce una rotación del plano de polarización similar al encontrado cuando se distribuyen de igual forma cranks (elementos quirales) [12] y, como cabía esperar, el medio carece de isotropía.

En la Fig. 4 se analiza la estructura M2 (ángulos rectos en cruz). En este medio los efectos individuales de los elementos metálicos tienden a compensarse de forma que el giro resultante producido a la onda incidente es nulo. En definitiva, el medio se comporta como no quiral, lo que demuestra que el giro obtenido en la estructura M1 es debido a un efecto polarizador de la misma, efecto independiente de la quiralidad del medio. Estos efectos son compensados por la propia distribución geométrica de las inserciones. Además, los resultados mostrados en la Fig. 4 no dependen de la orientación relativa entre el campo incidente y la posición de la muestra.

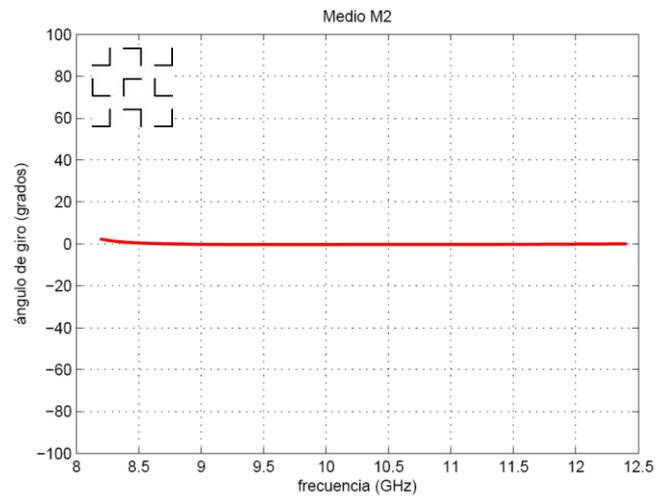


Fig. 4. Giro medido para un medio con inclusiones en forma de ángulo distribuidas en cruz (medio M2).

La estructura M3 es un conjunto tridimensional y presenta quiralidad (Fig. 5). En ella se muestran los resultados experimentales obtenidos cuando las estructuras individuales de cada plano se encuentran rotadas entre sí un ángulo $\varphi = 15^\circ$.

El medio M3 presenta una respuesta debida fundamentalmente al efecto quiral de la composición ya que el efecto polarizador de los ángulos ha sido compensado. Se observa como la respuesta se ajusta a un modelo matemático de Condon [14], con valores del signo del giro positivos y negativos en torno a la frecuencia de resonancia (~ 11.5 GHz). Además, hemos encontrado que el medio es isótropo y recíproco. Por lo tanto, el medio M3 puede ser considerado como un medio quiral.

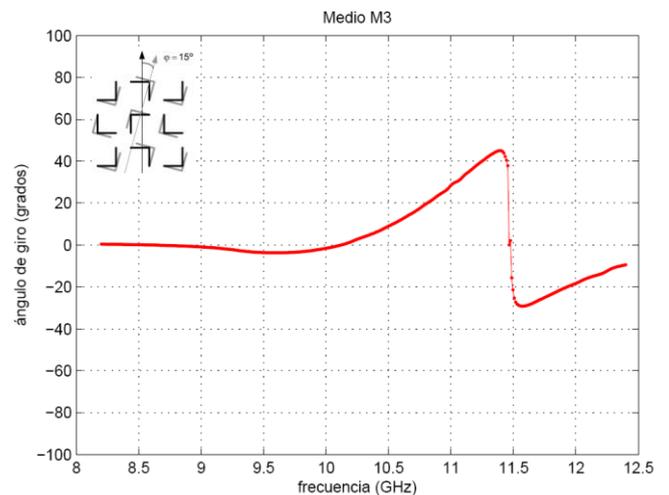


Fig. 5. Giro medido para un medio M3 con $\varphi = 15^\circ$.

Han sido analizadas otras implementaciones de la estructura M3, variando el espaciado entre los right angles, el tamaño de los mismos y el ángulo entre elementos de ambas caras, lográndose resultados acordes con los presentados. Hemos encontrado que, en general, un aumento en el espaciado de los elementos situados en la misma cara implica una disminución en el valor máximo del ángulo de giro y un aumento en su tamaño disminuye la frecuencia de resonancia a la que se produce el cambio del

signo del giro. El giro se maximiza para valores de φ próximos a $\pi/8$ y se reduce para los múltiplos de $\pi/4$. Conjugando de forma adecuada estos parámetros geométricos sería posible diseñar medios complejos con una amplia variedad de respuestas electromagnéticas.

Existe una gran similitud en los resultados mostrados (Fig. 5) con los obtenidos previamente con otras estructuras basadas en inclusiones ordenadas de elementos individuales quirales con forma de crank (estructuras tridimensionales). En la Fig. 6 se muestra el giro obtenido para una distribución en cruz de crank de dimensiones $L = 5.0$ mm y $w = 0.05$ mm (Fig. 1.a). El tercer segmento queda introducido perpendicularmente en el dieléctrico (espuma de poliuretano) [12].

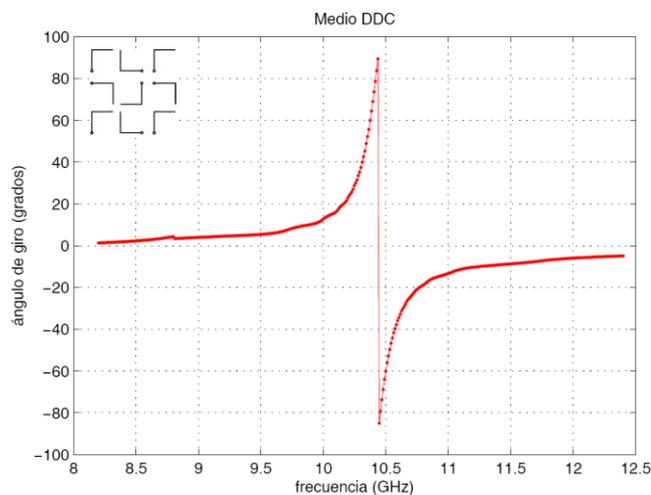


Fig. 6. Giro del plano de polarización en un medio realizado mediante inclusiones de elementos crank dispuestos en cruz. En el esquema superior se indica que el tercer segmento se introduce perpendicularmente en el medio dieléctrico.

Estos composites son biisótropos y recíprocos, y responden del mismo modo que otras estructuras encontradas en la bibliografía basadas en inclusiones individuales tridimensionales de geometría quiral. Puede observarse que la respuesta es más abrupta con valores de giro máximo superiores. No obstante, tal y como se ha indicado, es posible modificar estas respuestas variando los parámetros constructivos de los elementos individuales y su distribución espacial.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan y analizan diferentes estructuras basadas en la inclusión en dieléctrico de elementos individuales ordenados del tipo right angle. Se ha demostrado que una adecuada distribución espacial de los elementos individuales considerados puede llegar a cancelar los efectos de polarización de la estructura, dejando de manifiesto que el giro del plano de polarización de una onda linealmente polarizada que incida sobre el medio es debido fundamentalmente al fenómeno de la quiralidad de la misma. Los composites resultantes son medios biisótropos y recíprocos.

Se ha presentado un nuevo tipo de estructura, M3, capaz de producir actividad electromagnética. Además se ha

encontrado que variaciones en el tamaño de los elementos, en la separación entre los mismos y entre las dos superficies que los alojan producen cambios en la magnitud del giro y en el ancho de banda de la resonancia. Esto nos hace pensar que esta técnica puede servir de base para diseñar medios quirales con gran flexibilidad en la elección de la magnitud de giro y su ancho de banda.

En definitiva, podemos afirmar que es posible construir medios quirales partiendo de estructuras bidimensionales sencillas aquirales, siempre que el conjunto sea visto por la onda incidente, en términos de longitud de onda, como un conjunto tridimensional quiral. Esta técnica de construcción es susceptible de ser implementada mediante tecnología de circuito impreso (PCB), con las consiguientes ventajas de sencillez y coste que ello implica.

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] Lord Kelvin, "Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light", C.J. Clay and Sons, Cambridge University Press, Warehouse, London, 1904.
- [2] K. F. Lindman, "Über eine durch ein isotropes system von spiralförmigen 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] J. Margineda et al., "Sistema experimental en medio libre para caracterización electromagnética de medios quirales", XVIII Simposium Nacional URSI, La Coruña, 2003.
- [5] G. J. Molina-Cuberos et al., "Caracterización electromagnética de medios quirales artificiales mediante técnica de onda libre", XX Simposium Nacional URSI, Gandía, 2005.
- [6] A. Gómez, A. Lakhtakia, J. Margineda, G. J. Molina-Cuberos, M. J. Núñez, J. S. Ipiña, A. Vegas y M. A. Solano, "Full-wave hybrid technique for 3D isotropic-chiral-material discontinuities in rectangular waveguides: Theory and experiment", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 56, no. 12, pp. 2815-2825, 2008.
- [7] D. L. Jaggard, A. R. Mickelson y C. H. Papas, "On electromagnetic waves in chiral media", Journal of Applied Physics, vol. 18, pp. 211-216, 1979.
- [8] I. P. Theron y J. H. Cloete, "The optical activity of an artificial non-magnetic uniaxial chiral crystal at microwave frequencies", Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 10, pp. 539-561, 1996.
- [9] A. Cherepanov and A. Sihvola, "Internal electric field of anisotropic and bianisotropic spheres," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 10, pp. 79-91, 1996.
- [10] 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, pp. 353-358, Lisbon, 2000.
- [11] G. J. Molina-Cuberos et al. "Electromagnetic activity of quiral media based on crank inclusions", IEEE Microwave and Wireless Component Letters, vol. 19, 3, pp. 278-280, 2009.
- [12] A. J. García-Collado et al. "Electromagnetic activity at microwave frequencies by periodical lattice of crank inclusions in planar media", IEEE Microwave and Wireless Component Letters, vol. 20, 5, pp. 175-177, 2010.
- [13] A. V. Rogacheva, V. A. Fedotov, A. S. Schwanecke y N. I. Zheludev "Giant gyrotropy due to electromagnetic-field coupling in a bilayered chiral structure", PhysRevLett. 97, 177401, 2006.
- [14] E. U. Condon, "Theories of optical rotatory power", Rev. of Modern Phys., vol. 9, 432-457, 1937.