



URSI 2016

XXXI

SIMPOSIUM NACIONAL DE LA UNIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL DE RADIO

5, 6 Y 7 DE SEPTIEMBRE DE 2016
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

PATROCINADORES



RED-SPATEK
Spanish Terahertz Network



ROHDE & SCHWARZ



Editores:

Juan Córcoles Ortega, Julián Fierrez Aguilar, José M. Martínez Sánchez, José L. Masa Campos, Javier Ortega García y Jorge A. Ruiz Cruz (Eds.)

Diseño:

www.o3com.com

ISBN:

978-84-608-9674-6



*©Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional*

Metamaterial quiral plano de banda dual con alta actividad óptica

Oscar Fernández Fernández, Álvaro Gómez Gómez, José María Zamanillo Sainz de la Maza y Angel Vegas García.

oscar.fernandez@unican.es, alvaro.gomez@unican.es, jose.zamanillo@unican.es, angel.vegas@unican.es.
Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Edificio Ingeniería de Telecomunicación
Prof. José Luis García García. Plaza de la Ciencia S/N. 39005 Santander.

Abstract- Planar Chiral Metamaterials implemented on printed circuit technology provide a route to negative refractive index thanks to their high optical activity. The traditional planar chiral metamaterials are characterized by exhibiting chirality properties mainly in a single frequency band. This paper presents a planar chiral metamaterial structure constituted by two pairs of conjugated gammadions oriented in the same direction that shows high optical activity in two different frequency bands. The response in one of the frequency bands is produced by the longer conjugated gammadion pair, while the response in the second frequency band is produced by the combination of both pairs. The geometric parameters of shorter conjugated gammadion are optimized to rotate the polarization plane up to 80° .

I. INTRODUCCIÓN

Los metamateriales son materiales artificiales compuestos que presentan propiedades electromagnéticas inusuales en la naturaleza. Estas cualidades proceden de la distribución ordenada de sus compuestos y no son inherentes a las propiedades de los mismos. Los metamateriales quirales (Chiral MetaMaterial, CMM), forman un subconjunto dentro de los metamateriales caracterizado por presentar altos valores de actividad óptica y/o dicroísmo circular. A partir de estas propiedades es posible la obtención de refracción negativa [1].

Las estructuras CMM implementadas en circuito impreso (Printed Circuit Board, PCB) presentan grandes ventajas frente a otro tipo de estructuras quirales más tradicionales: diseño plano, uso de técnicas de fabricación en PCB existentes, bajo coste de elaboración y facilidad en la producción en masa. En la literatura se presentan diferentes diseños de estructuras CMM planas, los cuales se pueden concentrar en dos grandes grupos. El primero lo forman las estructuras denominadas “giro mutuo”, las cuales presentan un patrón, quiral [2] o aquiral [3], con simetría C_4 y un giro relativo entre ambas caras del PCB. El segundo grupo, denominado estructuras “de caras conjugadas”, comprende diseños con simetría C_4 en los que el diseño de una de las caras es el enantiómero de la otra, con o sin rotación [4]- [6].

Una característica que presentan las estructuras comentadas [2-6] es que presentan actividad óptica en una única banda de frecuencias. Si se desea conseguir actividad óptica en dos bandas de frecuencia hay que acudir a otras técnicas como pueden ser las basadas en:

a) Estructuras compuestas por componentes que incorporan algún tipo de asimetría: longitudes o giros mutuos diferentes [7,8,9].

b) La combinación de reproducciones de una estructura con diferentes dimensiones dentro de la celda unidad. Estas réplicas se pueden combinar en una única estructura [10], Fig. 1a, o se pueden mantener separadas [11] dentro de la celda unidad, Fig. 1b. Una ventaja que presenta esta técnica es que posibilita el uso de estructuras ampliamente estudiadas para conseguir una respuesta similar en dos bandas frecuenciales diferentes.

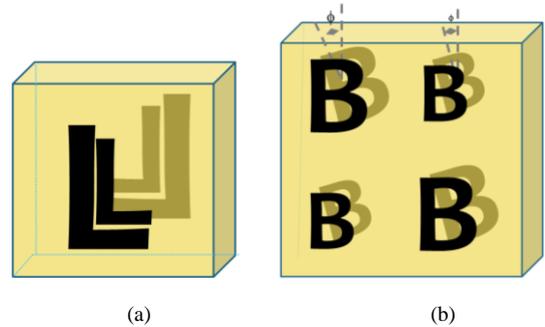


Fig. 1. Representación de una estructura de banda dual con replicas escaladas (a) combinadas (b) separadas.

En esta comunicación se presenta un diseño basado en la combinación de reproducciones en el que se solapan las diferentes réplicas. De esta manera, las dimensiones de la celda unidad son similares a las de la estructura inicial (no es necesario ampliar la celda unidad como en el caso de no agruparlas [11]). La estructura en cuestión es un metamaterial quiral formado por cruces gamadas conjugadas de diferentes tamaños. Este tipo de material puede ser utilizado para fabricar absorbentes, polarizadores o rotadores de la polarización lineal que requieran trabajar en dos bandas de frecuencia. Además, como aplicación práctica puede usarse como superestrato de antenas microstrip [12,13] para modificar las características de radiación de la antena original para aplicaciones multibanda. Por ejemplo, antenas para sistemas FDD (Frequency Division Duplex) donde el enlace uplink y downlink trabajan en frecuencias diferentes.

II. METAMATERIAL QUIRAL DE BANDA DUAL

En este apartado se describe la estructura metamaterial quiral propuesta. La celda unidad está formada por dos cruces gamadas conjugadas de diferentes tamaños orientadas en el mismo sentido y solapadas en sus ejes principales (Fig. 2a). La respuesta en frecuencia de la estructura viene marcada no solo por las dimensiones físicas de ambas cruces, sino también por el solapamiento entre ambas. La estructura presenta

quiralidad 3D al diseñar una de las caras como el enantiómero de la otra cara.

En la estructura analizada, el aspa interior (Fig 2b) se orienta en la misma dirección que la exterior (Fig 2a). Este diseño representa una simplificación del presentado en [10] al solapar ambas cruces en los ejes x e y.

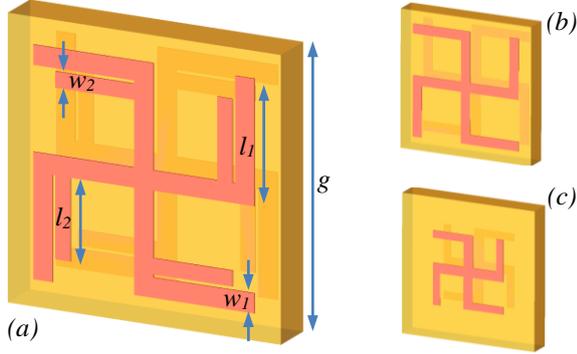


Fig. 2. Estructura cruz gamada doble, (a) cruz externa, (b) cruz interna, (c) estructura conjunta.

El diseño presenta los siguientes parámetros geométricos: $l_1 = 4$ mm, $l_2 = 2.65$ mm, $w_1 = 0.7$ mm, $w_2 = 0.52$ mm y $g = 10$ mm. El sustrato, Rogers 3003, tiene un grosor de 1.6 mm con una constante dieléctrica $\epsilon_r = 3$ y $\text{tg } \delta = 0.0019$. Las metalizaciones presentan un grosor de $36 \mu\text{m}$.

A. Caracterización de la estructura

La caracterización de la estructura se ha realizado a partir del algoritmo de recuperación de parámetros publicado en [11] para metamateriales quirales basado en el método Nicolson-Ross-Weir. Este procedimiento parte del cálculo de los coeficientes de transmisión y reflexión co-polar y cross-polar del material para una onda incidente linealmente polarizada. Procesando estos coeficientes mediante el método de la matriz de Jones [12], se consiguen los coeficientes de transmisión (t_{++} y t_{--}) y reflexión ($r_{++} = r_{--} = r$) de ondas circularmente polarizadas a derechas (+, RHCP) y a izquierdas (-, LHCP). En t_{++} el primer subíndice indica el tipo de polarización circular de la onda transmitida y el segundo el de la onda incidente.

La quiralidad introducida por el metamaterial genera una rotación (θ) del plano de polarización (actividad óptica) calculada según (1) y/o una distorsión de la polarización de la onda (dicroísmo circular) cuantificada a través de la elipticidad (η) de la polarización de acuerdo a (2)

$$\theta = -\frac{1}{2} [\arg(t_{++}) - \arg(t_{--})] \quad (1)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{|t_{++}|^2 - |t_{--}|^2}{|t_{++}|^2 + |t_{--}|^2} \right) \quad (2)$$

La impedancia normalizada del medio y el índice de refracción para la onda RHCP (n_+) y la onda LHCP (n_-) se obtienen a partir de los coeficientes medidos de transmisión y reflexión de ondas circulares según (3) y (4).

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1+r)^2 - t_{++}t_{--}}{(1-r)^2 - t_{++}t_{--}}} \quad (3)$$

$$n_{\pm} = \frac{-i}{k_d d} \left\{ \ln \left[\frac{1}{t_{\pm\pm}} \left(1 - \frac{Z-1}{Z+1} r \right) \right] \pm 2m\pi \right\} \quad (4)$$

Para una dependencia temporal $e^{j\omega t}$, el signo de (3) y el valor del entero m de (4) se obtienen bajo las siguientes condiciones:

$$\text{Re}(Z) > 0, \text{Im}(n_{\pm}) < 0$$

Una vez obtenidos Z y n_{\pm} , el resto de los parámetros característicos equivalentes de la estructura se obtiene a partir de (5) – (7)

$$n = \frac{n_+ + n_-}{2} \quad (5)$$

$$\epsilon = \frac{n}{Z}, \quad \mu = nZ \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{n_+ - n_-}{2} \quad (7)$$

El estudio numérico de las estructuras se ha realizado con el simulador 3D EMPro de Keysight Technologies, utilizando el motor de diferencias finitas en el dominio del tiempo.

III. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados correspondientes al diseño de la estructura cruz gamada conjugada doble. Se puede comprobar en la Fig. 3 que la rotación del plano de polarización en función de la frecuencia presenta valores diferentes de cero en dos bandas diferenciadas. Comparando con la respuesta de la cruz gamada simple, se comprueba como la primera de las bandas, entorno a la frecuencia de 7 GHz, es debida a la cruz exterior, coincidiendo con la respuesta de la cruz gamada simple. La segunda banda de frecuencias, centrada en torno a 17 GHz, se debe al insertar la cruz interna. En esta segunda banda, la estructura presenta dos resonancias, 16.4 GHz y 17.7 GHz, en torno a las cuales, tanto rotación como elipticidad presentan sus máximos valores (Fig. 3 y 4).

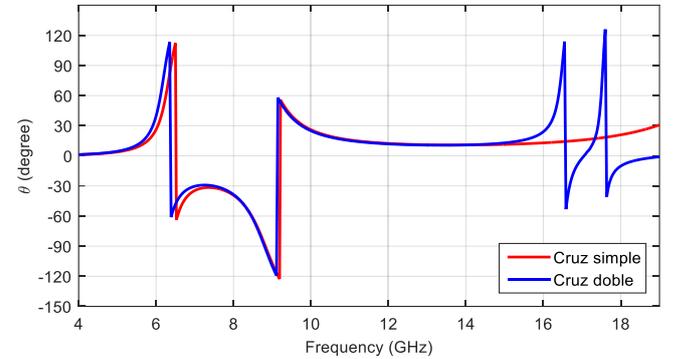


Fig. 3. Rotación del plano de polarización en las estructuras cruz gamada simple y cruz doble

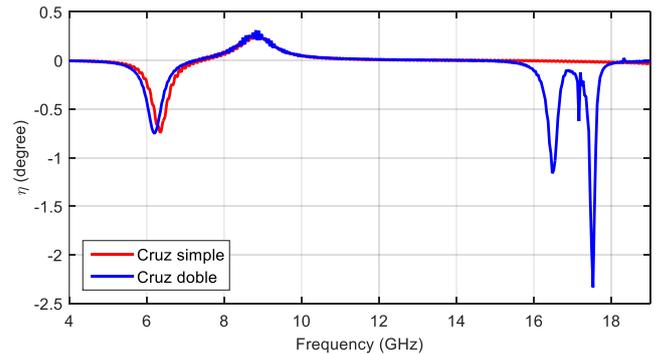


Fig. 4. Elipticidad en estructura cruz gamada simple y cruz gamada doble

Por otra parte, el índice de refracción muestra dos resonancias en cada banda de frecuencias. A diferencia de la primera banda donde cada componente presenta una resonancia, en la segunda banda, es el índice de refracción n_+ el que presenta ambas resonancias. En esta segunda banda se obtiene un índice de refracción, n_+ , negativo, muy próximo a cero, en una estrecha banda de frecuencias por encima de las resonancias.

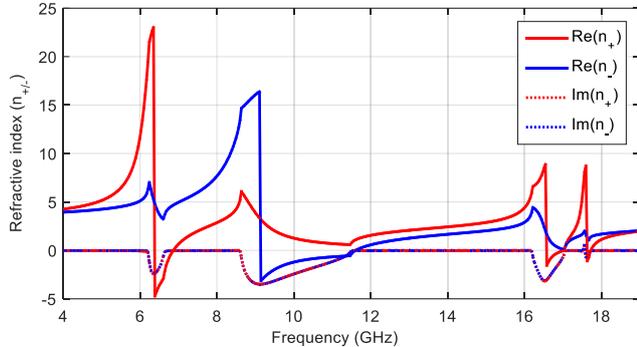


Fig. 5. Índice de refracción n_{\pm} de la estructura cruz gamada doble con aspas orientadas en el mismo sentido

Para mejorar la actividad óptica de la estructura en la segunda banda de frecuencias, se evalúa la dependencia de θ con los parámetros geométricos del aspa interna. En concreto se analiza la influencia de los parámetros longitud (l_2) y el grosor de la pista (w_2).

En primer lugar, se muestra la influencia de l_2 sobre la rotación del plano de polarización. Este parámetro representa la longitud de los brazos del aspa interna. La Fig. 6 presenta la rotación en función de la frecuencia para valores de l_2 entre 2 y 3 mm. Se observa que, para longitudes de aspa cercanas a 3 mm, ambas resonancias se encuentran muy próximas. Al disminuir esta longitud, la respuesta de la estructura sube en frecuencia y presenta una mayor separación entre las resonancias. Este desplazamiento en frecuencia se debe a la disminución de la longitud total de la cruz, $4 \cdot l_2 - w_2$.

Para valores de l_2 menores, cercanos a 2 mm, entre ambas resonancias aparece una banda de frecuencias con valores de rotación elevados. En esta banda el valor de la rotación pura (sin elipticidad) llega hasta 60° .

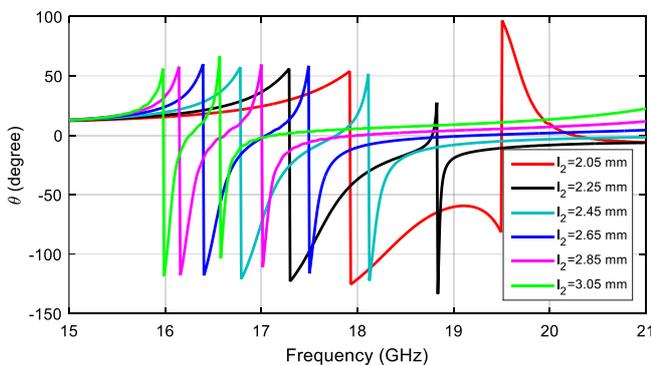


Fig. 6. Rotación del plano de polarización en función de l_2

En segundo lugar, se evalúa la influencia del grosor del aspa, w_2 , considerando una longitud $l_2 = 2$ mm. Se puede observar en la Fig. 7, como el aumento de la anchura de la pista influye notablemente en la rotación. Por una parte, al reducirse la longitud total del aspa, se desplaza la respuesta en frecuencia de la estructura hacia valores superiores. Por otra parte, incrementa los valores de rotación pura, pasando de -26°

para $w_2 = 0.2$ mm a 17.75 GHz hasta -83° a 19.4 GHz para un grosor de pista de 0.6 mm. Teniendo en cuenta que el grosor del dieléctrico son 0.1λ a 19.4 GHz (60 mil) la rotación es de $830^\circ / \lambda$.

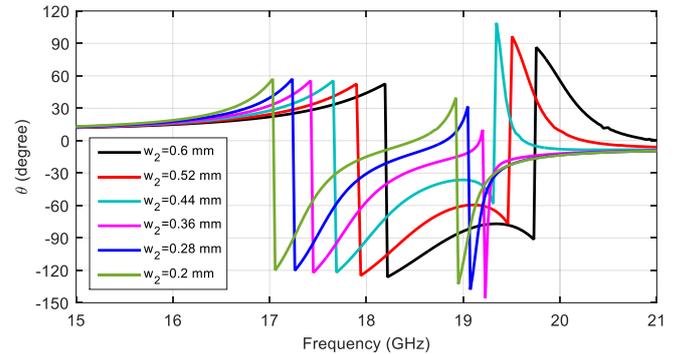


Fig. 7. Rotación del plano de polarización en función de w_2

IV. CONCLUSIONES

En esta comunicación se ha presentado una estructura metamaterial quiral plana con respuesta en banda dual. La respuesta en frecuencia de la estructura propuesta muestra actividad óptica en dos bandas muy diferenciadas producidas en una de ellas por la cruz exterior y en la segunda banda por la combinación de ambas cruces. Mediante el ajuste de los parámetros geométricos de la cruz interna es posible la obtención de valores de rotación de hasta 80° , lo que representa una elevada actividad óptica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España a través del proyecto de investigación TEC2014-55463-C3-3-P.

REFERENCIAS

- [1] J. B. Pendry, "A chiral route to negative refraction", *Science*, vol. 306, no. 5700, pp. 1353-1355, Nov. 2004.
- [2] E. Plum, J. Zhou, J. Dong, V. A. Fedotov, T. Koschny, C. M. Soukoulis, and N. I. Zheludev, "Metamaterial with negative index due to chirality", *Phys. Rev. B*, vol. 79, 035407, Jan. 2009.
- [3] J. Zhou, J. Dong, B. Wang, T. Koschny, M. Kafesaki, and C. M. Soukoulis, "Negative refractive index due to chirality", *Phys. Rev. B*, vol. 79, 121104, Mar. 2009.
- [4] J. Li, F. Q. Yang, and J. F. Dong, "Design and simulation of l-shaped chiral negative refractive index structure", *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 116, pp. 395-508, May 2011.
- [5] R. Zhao, L. Zhang, J. Zhou, Th. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index", *Phys. Rev. B*, vol. 83, 035105, Jan. 2011.
- [6] Y. Ye, X. Li, F. Zhuang, and S. W. Chang, "Homogeneous circular polarizers using a bilayered chiral metamaterial", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, 031111, Jul. 2011.
- [7] J. Shi, X. Liu, S. Yu, T. Lv, Z. Zhu, H. F. Ma, and T. J. Cui, "Dual-band asymmetric transmission of linear polarization in bilayered chiral metamaterial", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, 191905, May 2013.
- [8] D. Zarifi, M. Soleimani, and V. Nayyeri, "A novel dual-band chiral metamaterial structure with giant optical activity and negative refractive index" *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, Vol. 26, 251-263, 2012.
- [9] L. Min-Hua, G. Lin-yan, and Y. He-Lin, "Experimental and simulated study of dual-band chiral metamaterials with strong optical activity", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 56, no. 10, Oct. 2014.
- [10] D. Zarifi, M. Soleimani, and V. Nayyeri, "Dual- and multiband chiral metamaterial structures with strong optical activity and negative refraction index", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 334-337, Mar. 2012.

- [11] F. Fang and Y. Cheng, "Dual-band terahertz chiral metamaterial with giant optical activity and negative refractive index based on cross-wire structure", *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 31, pp. 59-69, May 2013.
- [12] J. Gutiérrez, Ó. Fernández, J. P. Pascual, Á. Gómez, A. Tazón, Á. Vegas, Á. Mediavilla, "W-Band Linear Array of Planar Antennas and Chiral Metamaterial Cover" *International Journal of Microwave & Optical Technology*, vol. 9 Issue 6, p 384, Nov 2014
- [13] O. Fernandez, A. Gámez, J. Gutierrez, A. Tazon, A.Vegas, J.P. Pascual, "Enhancement of the radiation properties of a linear array of planar antennas with a chiral metamaterial cover," *Electron Devices (CDE), 2013 Spanish Conference on* , vol., no., pp.223,226, 12-14 Feb. 2013
- [14] R. Zhao, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Chiral metamaterials: retrieval of the effective parameters with and without substrate," *Opt. Express*, vol. 18, no. 14, pp. 14553–14567. Jul 2010.
- [15] C. Menzel, C. Rockstuhl, F. Lederer, "Advanced Jones Calculus for the classification of periodic metamaterials," *Phys. Rev. A*, vol. 82, No. 5, 053811, Nov. 2010.