

Estudio de doble lámina con estructuras quirales de cuatro manivelas bajo incidencia normal

J. Margineda¹, G. J. Molina-Cuberos¹, A. J. García-Collado^{1,2}, E. Martín¹

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

⁽¹⁾Dpto. de Electromagnetismo y Electrónica, Universidad de Murcia, Murcia, España

⁽²⁾Geomática, Teledetección y SIG Aplicados, Universidad Católica San Antonio, Murcia, España

Abstract- A double plate with chiral structures based on three segment cranks is analysed for normal incidence and lineal polarization. Each structure is made with four three segment crank arranging a rectangular parallelepiped. These structures are distributed in a periodic configuration in each sheet, being the respective unit cells perfectly lined up. The response depends on spacing between plates. Interesting results are obtained for small spacing: the chiral behaviour depends on the spacing then the double sheet system can be used as tunable rotator.

I. INTRODUCCIÓN

Los materiales quirales, conocidos desde mediados del siglo XIX, presentan un acoplamiento eléctrico-magnético representado por las ecuaciones constitutivas características:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} - j\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \kappa \vec{H}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + j\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \kappa \vec{E}$$

Como consecuencia, presentan unos efectos sobre la propagación de ondas electromagnéticas, como rotación de la polarización, dicroísmo, absorción, etc. que los hacen muy interesantes para diversas aplicaciones en circuitos de microondas. No existen materiales naturales que presenten este comportamiento a frecuencias de microondas pero, desde hace casi un siglo, se conocen métodos para obtener este tipo de materiales de forma artificial. La forma tradicional consiste en la distribución aleatoria de elementos quirales, usualmente, hélices metálicas, en un sustrato dieléctrico [1-4]. Recientemente se han introducido nuevas estructuras de geometría más simple como las “manivelas” (*cranks*) formadas por tres segmentos metálicos (por lo menos) en sustitución de las hélices [5, 6]. En los últimos años, la distribución ordenada de este tipo de estructuras han mostrada ventajas frente a la distribución aleatoria [7].

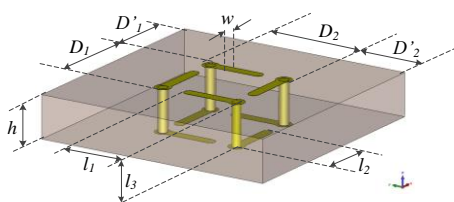


Fig. 1. Estructura 4CR formada por cuatro manivelas enfrentadas que constituyen una celda unidad con forma de paralelepípedo.

En anteriores trabajos [8, 9] hemos estudiado el comportamiento de una lámina con la estructura denominada 4CR (Fig. 1) repetida en forma periódica bajo incidencia normal. Como se puede ver en dicha figura, esta estructura está basada en cuatro manivelas de tres lados formando un paralelepípedo.

En este trabajo presentamos el estudio del comportamiento de dos láminas iguales constituidas por la misma estructura (Fig. 2). Como mostramos, los resultados obtenidos indican que la doble lámina puede utilizarse como un rotador de polarización sintonizable.

II. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

En la Fig. 2 se muestra la disposición de las dos láminas. Denominaremos S a la separación entre las mismas. Las láminas están dispuestas de forma que las respectivas celdas base están perfectamente enfrentadas, como se muestra en el detalle de la figura.

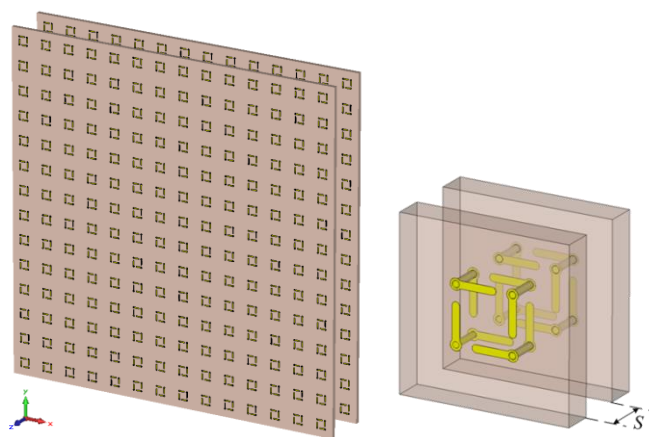


Fig. 2. Doble lámina con detalle de la doble celda unidad.

Las medidas de la celda unidad (Fig. 1) son las siguientes: $l_1 = l_2 = 3.5$ mm, $l_3 = 2.4$ mm, $w = 0.6$ mm, $D_1 = D_2 = 4.5$ mm y $D_1' = D_2' = 4.5$ mm, lo que supone una periodicidad de $D_1 + 2D_1' = 13.5$ mm. Las láminas están realizadas sobre sustrato FR-4 ($\epsilon_r = 4.3$, $\tan(\delta) = 0.024$ a 10 GHz), con 2.4 mm de grosor (h). Las dimensiones están determinadas para observar efectos de interés en la banda de estudio, banda X.

III. SIMULACIÓN

La simulación numérica se ha llevado a cabo con el software *CST Microwave Studio*. Se partió del diseño ya analizado de una sola lámina [9] y se duplicó esta lámina mediante traslación. La distancia entre láminas se ha parametrizado con objeto de poder variarla de forma automática (*ParameterSweep*). En la simulación se ha considerado que las láminas son infinitas partiendo de una celda base y aplicando condiciones de contorno tipo *unitcell*. En estas condiciones se establecen automáticamente puertos de Floquet y se determinan los parámetros S de cada modo que se considere en la excitación, con él mismo y con todos los demás. En la simulación se ha considerado como excitación (en el puerto situado en Z_{min}) el modo $TE(0,0)$ que corresponde a una onda plana con campo eléctrico polarizado según OY (propagándose según OZ , en incidencia perpendicular a las láminas). Se han estudiado sólo el modo incidente y el siguiente que corresponde a onda plana con polarización cruzada (campo eléctrico polarizado según OX). Los coeficientes de transmisión para la componente copolar (*co*) y la componente crosspolar (*cross*) corresponden, por tanto, a $SZ_{max(1),Z_{min}(1)}$ y $SZ_{max(2),Z_{min}(1)}$, respectivamente.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha estudiado la doble lámina con distancias entre ellas pequeñas, de 0.1 mm hasta 0.5 mm; también con distancias grandes, del orden de la longitud de onda. En la Fig. 3 se muestran los resultados obtenidos para distancias pequeñas, comparados con la respuesta de una sola lámina. La doble lámina presenta un comportamiento similar a una lámina pero la resonancia aparece a frecuencias más bajas. En todos los casos, la onda transmitida en la frecuencia de resonancia es una onda con polarización elíptica con el eje menor muy pequeño comparado con el eje mayor o, lo que es lo mismo, con una razón axial grande (cociente de eje mayor respecto al menor [10]), es decir, polarización casi lineal, con una rotación del eje mayor de 90° respecto a la onda incidente. La relación de excitación de onda *cross* respecto a onda *co* es notablemente mayor que la obtenida con una sola lámina. La frecuencia de resonancia aumenta con la separación entre ambas láminas manteniéndose siempre por debajo de la frecuencia de resonancia de una sola lámina.

Los resultados obtenidos parecen indicar que para estas distancias la doble lámina no se comporta como la “suma” de dos láminas iguales, si no como una lámina con *celda unidad doble*.

Si la distancia entre ambas láminas se hace muy grande, del orden de la longitud de onda o mayor, los resultados obtenidos sí indican un comportamiento “suma” de dos individuales, Fig. 4. La frecuencia de resonancia coincide con la de una sola lámina y la onda transmitida a esta frecuencia es una onda con polarización elíptica con el eje principal rotado 180° respecto a la incidente. En una situación ideal en la que cada lámina produjera una rotación de 90° manteniendo la polarización lineal, el resultado esperado sería una onda polarizada linealmente con una rotación de 180° respecto a la incidente. Sin embargo, y fundamentalmente debido a pérdidas en la lámina, la onda transmitida por la primera lámina presenta una polarización con cierta elipticidad [9] y, por eso, la onda transmitida por la segunda lámina presenta una configuración un poco más

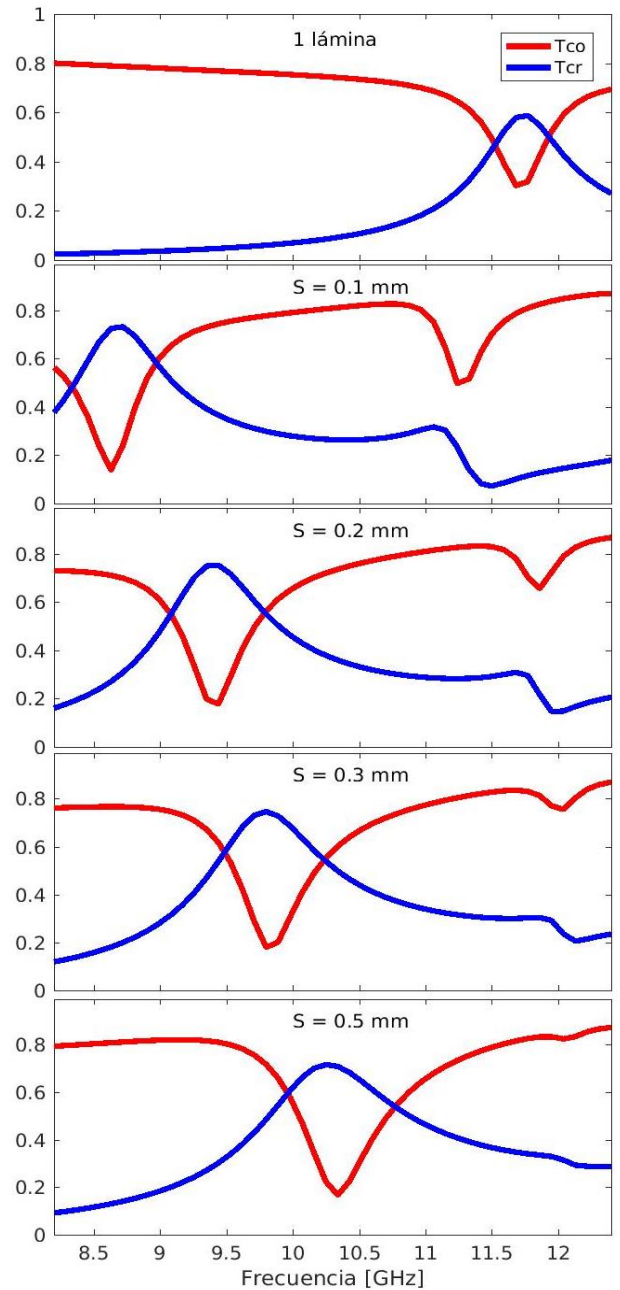


Fig. 3. Doble lámina para $S=0.1$ a 0.5 comparado con una lámina. En rojo se presenta $SZ_{max(1),Z_{min}(1)}$ (transmisión *co*) y en azul $SZ_{max(2),Z_{min}(1)}$ (transmisión *cross*).

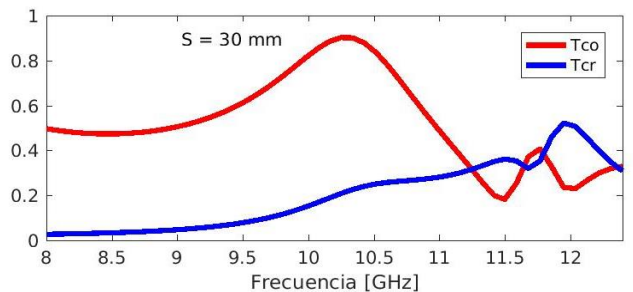


Fig. 4. Doble lámina para separación grande, $S=30$ mm. En rojo se presenta $SZ_{max(1),Z_{min}(1)}$ (transmisión *co*) y en azul $SZ_{max(2),Z_{min}(1)}$ (transmisión *cross*).

complicada (Fig. 4). Lógicamente este efecto se acentúa a frecuencias próximas a, pero fuera de, la resonancia dado que la polarización de la onda transmitida por la primera lámina presenta una razón axial menor (ejes de la elipse

comparables). A pesar de ello, se puede afirmar que en caso de distancias grandes entre ambas láminas el efecto total es la suma del efecto de cada lámina por separado: el coeficiente de transmisión *cross* sólo es significativo en la zona de resonancia.

Por el contrario, para separaciones pequeñas el efecto aparece en otras frecuencias dependiendo del valor de la separación (Fig. 3) y la polarización de la onda transmitida presenta una polarización casi lineal (Fig. 5), muy parecida a la que presenta la onda transmitida por una lámina [9]. Por simplicidad en la Fig. 5 se ha dibujado la polarización sólo para $S = 0.5$ mm, pero la respuesta es muy parecida para todas las separaciones entre 0.1 y 0.5 mm.

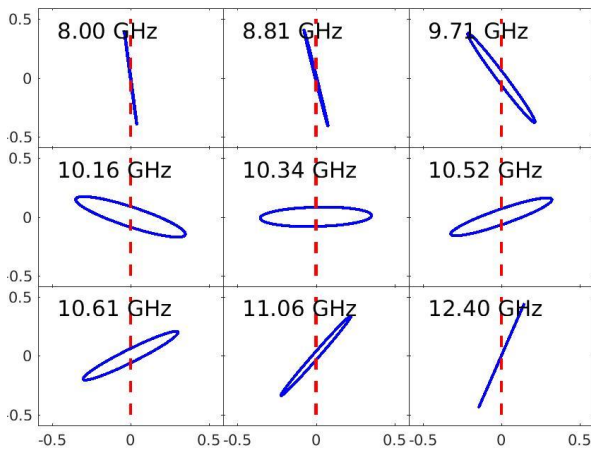


Fig. 5 Polarización de la onda transmitida por la doble lámina para $S = 0.5$ mm.

Con los resultados obtenidos, representados en la Fig. 3 podemos calcular el índice de refracción y la quiralidad que presenta la estructura de doble lámina a pequeñas distancias utilizando un algoritmo de inversión típico de las técnicas de medidas [9]. En la Fig. 6 mostramos los resultados para una separación de 0.5 mm.

A la vista de los resultados, la doble lámina puede permitir el diseño de rotadores de polarización sintonizables construyendo un dispositivo que permitiera el desplazamiento de una lámina respecto a otra.

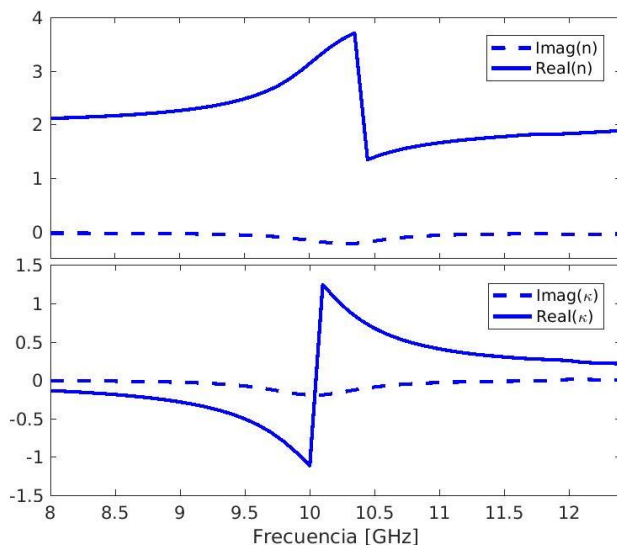


Fig. 6 Índice de refracción (gráfica superior) y quiralidad (gráfica inferior) de la doble lámina para $S = 0.5$ mm considerado como un material quiral homogéneo.

Se están haciendo trabajos en el laboratorio cuyos primeros resultados confirman las predicciones de las simulaciones.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el estudio de una doble lámina con estructuras quirales basadas en manivelas. Cuando las dos láminas están separadas por una distancia significativa (del orden de la longitud de onda o mayor) se comportan como láminas independientes bajo la incidencia correspondiente y el sistema se puede analizar estudiando ambas láminas separadamente; la frecuencia en la que ocurre los fenómenos ligados a la quiralidad es la misma que para una sola lámina.

Sin embargo, cuando la distancia es pequeña, se observa un acoplamiento entre las estructuras de ambas láminas y ocurren fenómenos nuevos: las frecuencias en que aparecen las rotaciones de polarización difieren de las correspondientes a las de una sola lámina y, además, dependen de la distancia entre las dos láminas sugiriendo la posibilidad de utilizarlo para el diseño de rotadores de polarización sintonizables.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación TEC 2014-55463-C3-1-P.

REFERENCIAS

- [1] K. F. Lindman, "Über eine durch ein isotropes system von spiral-förmigen resonatoren erzeugte rotationspolarisation der elektromagnetischen wellen", *Annalen der Physik.*, vol. 63, pp 621-644, 1920.
- [2] I. Tinoco, M. P. Freeman, "The optical activity of oriented copper helices": I. Experimental", *J. Phys. Chem.*, vol. 61, pp 1196-1200, 1957.
- [3] R. Ro, V. V. Varadan, V. K. Varadan, "Electromagnetic activity and absorption in microwavw composites", *Proc. Inst. Elect. Eng. H*, vol. 139, no 5, pp 441-448, 1992.
- [4] A. Gómez, A. Lakhtakia, J. Margineda, G. J. Molina-Cuberos, M. J. Núñez, J. S. Ipiña, A. Vegas, 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, 2815-2825, 2008.
- [5] J. H. Cloete, M. Bingle, D. B. Davidson, "Scattering and absorption by thin metal wires in rectangular waveguide-chiral cranks versus non chiral staples", in *Proc. 8th Int. Conf. Electromag. Complex Media*, pp. 353-358, Lisbon, Portugal 2000.
- [6] G. J. Molina-Cuberos, A. J. García-Collado, J. Margineda, M. J. Núñez, E. Martín, "Electromagnetic activity of chiral media based on crank inclusions" *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 19, no 5, pp. 278-280, 2009.
- [7] A. J. García-Collado, G. J. Molina-Cuberos, J. Margineda, M. J. Núñez E. Martín, "Isotropic and homogeneous behavior of chiral media based on periodical inclusions of cranks", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 20, No. 3, 175-177, 2010.
- [8] A. J. García-Collado, G. J. Molina-Cuberos, M. J. Núñez, J. Margineda, "Caracterización experimental de medios quirales basados en inclusiones periódicas. El resonador de cuatro manivelas", XXVI Congreso Nacional URSI, Leganés (Madrid), 2011.
- [9] A. J. García-Collado, G. J. Molina-Cuberos, M. J. Núñez, E. Martín, J. Margineda, "Negative Refraction of Chiral Metamaterial Based on Four Crank Resonators," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 26:7, 986-995, 2012.
- [10] A. C. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, J. Wiley & sons, 2008.