

Caracterización Electromagnética de Medios Quirales

J. Margineda¹, G. J. Molina-Cuberos¹, M. J. Núñez¹, A. J. García-Collado^{1,2}

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

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

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

Abstract- Experimental techniques for chiral media characterization at microwave frequencies are reviewed. Free-wave, waveguide and resonators techniques found in the current literature and the author's own experience are discussed. Some free-wave results are presented. Finally, a critical discussion about each technique feasibility is presented.

I. INTRODUCCIÓN

La caracterización electromagnética de medios quirales es un tema básico en muchas áreas de investigación dentro del Electromagnetismo. El objetivo final consiste en determinar los parámetros de permitividad eléctrica y permeabilidad magnética en las ecuaciones constitutivas. Para medios homogéneos e isotropos, dichas ecuaciones se pueden escribir como:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}, \quad (1)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (2)$$

siendo ϵ_r y μ_r dos parámetros complejos que, en general, dependen de la frecuencia. A pesar de existir un gran número de trabajos involucrando estudios teóricos y experimentales, la aparición de nuevos materiales con propiedades que extreman los parámetros constitutivos hace que la caracterización electromagnética sea una cuestión sin solución satisfactoria en todos los casos.

Los medios quirales son un tipo especial de material caracterizados por cumplir relaciones constitutivas más complejas que las indicadas en eq. (1-2). La propagación de una señal linealmente polarizada a través de estos materiales presenta dispersión rotatoria (cambios en la dirección de polarización) y dicroísmo circular (cambios en la polarización de lineal a elíptica) [1]. Para describir macroscópicamente el comportamiento de los quirales se debe incluir en las relaciones constitutivas un parámetro de acoplamiento entre los campos eléctricos y magnéticos, denominado quiralidad, κ , obteniéndose unas nuevas ecuaciones:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} - j \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \kappa \vec{H} \quad (3)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + j \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \kappa \vec{E} \quad (4)$$

La existencia del parámetro κ , hace que los campos eléctricos y magnéticos no se puedan separar en la expresión usual de la ecuación de onda. Para facilitar el estudio, se recurre a expresar una señal linealmente polarizada como suma de dos con igual amplitud y distinta polarización circular, una a derechas y otra a izquierdas [2]. Estas dos

ondas son los modos de propagación en el medio quiral. Cada modo viaja como si se propagara en un medio que fuera isotropo y homogéneo, con número de onda e índice de refracción dado por:

$$n_{\pm} = n \pm \kappa = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} (1 \pm \kappa_r) = n (1 \pm \kappa_r) \quad (5)$$

$$k_{\pm} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} (1 \pm \kappa_r), \quad (6)$$

donde $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, $\kappa_r = \kappa / \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ es la quiralidad relativa del medio, $+$ y $-$ representan los modos a derechas y a izquierdas, respectivamente.

El acoplamiento entre los campos eléctricos y magnéticos aumenta la complejidad en la caracterización de medios quirales. En este trabajo se hace una revisión de las principales técnicas de caracterización descritas en la literatura hasta el momento, clasificándolas en tres grupos: medio libre, guías de onda y resonadores.

II. TÉCNICAS EN MEDIO LIBRE

La caracterización de los materiales quirales requiere la determinación de tres parámetros complejos (ϵ_r , μ_r , κ) para lo que se requiere la medida experimental de tres magnitudes independientes. Las técnicas usuales de caracterización en medio libre [3-7], basadas en la determinación experimental de los coeficientes de reflexión y transmisión, no proporcionan información suficiente para describir los cambios en la polarización necesarios para caracterizar quirales. Se necesita medir, al menos, una magnitud extra, en módulo y fase, para poder determinar los tres parámetros constitutivos.

Normalmente se miden dos coeficientes de transmisión, que corresponden a polarizaciones paralela y perpendicular a la señal incidente, T_{CO} y T_{CR} , denominados coeficientes de transmisión "copolar" y "crosspolar". Si el ángulo de rotación y la componente perpendicular son pequeños, se puede optar por determinar la transmisión en otros ángulos y realizar las transformaciones necesarias para obtener T_{CO} y T_{CR} [5, 6].

La técnica usual en medio libre consiste en el empleo de dos antenas (transmisora Tx y receptora Rx), un bastidor para las muestras, un analizador vectorial y un kit de calibración adecuado a la banda de frecuencias de estudio. Para minimizar los efectos de difracción en las distintas partes del sistema es necesario disminuir la anchura del haz incidente en la muestra o aproximar las antenas a la misma. Si optamos por esta última solución, no se garantiza que se cumplan condiciones de onda plana, lo que invalida los

habituales algoritmos de inversión basados en onda plana, y, además, aumenta el número de reflexiones múltiples entre las antenas y la muestra, lo que introduce errores en las medidas.

El tamaño del haz se puede reducir colocando elementos focalizadores [3-7], que pueden ser espejos elipsoidales auxiliares [3, 7] o lentes dieléctricas en la salida de la antena [4-6].

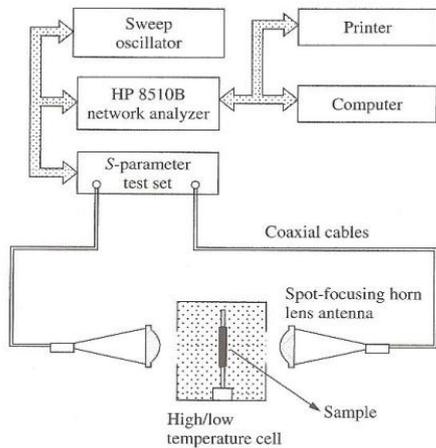


Fig. 1. Sistema de medida en medio libre con lentes focalizadoras en las antenas [5].

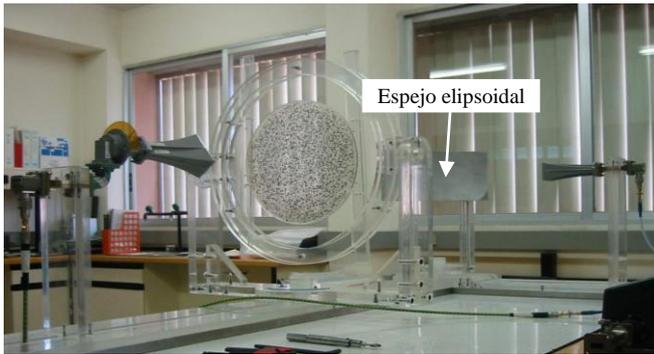


Fig. 2. Sistema experimental en medio libre con espejo focalizador para banda X.

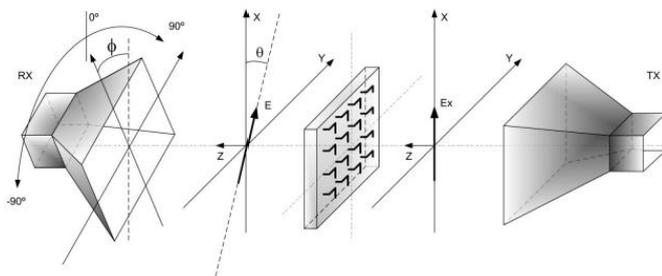


Fig. 3. Diagrama para la determinación experimental del ángulo de rotación, θ . Por simplicidad no se muestra el sistema de focalización.

La Figura 1 presenta un esquema del sistema de caracterización de medios quirales desarrollado por Varadan et al., [4-6]; utiliza antenas con una lente para focalizar la señal, colocándose el medio bajo estudio en el plano focal de ambas antenas. La Figura 2 muestra una imagen de un sistema experimental desarrollado por los autores que utiliza un espejo como elemento focalizador [3, 7]. La antena emisora y el medio se colocan en los focos del espejo elipsoidal; mientras que la antena receptora se coloca tras la

muestra a una distancia de ésta igual a la focal. La Figura 3 presenta un diagrama del sistema experimental, donde la señal incide con polarización lineal en la dirección del eje-x, y es rotada un ángulo θ por el medio quiral. La antena receptora debe ser capaz de rotar alrededor de su eje y determinar el parámetro S_{21} para, al menos, dos direcciones de polarización.

Los parámetros S se miden mediante un analizador de redes vectorial. Para ello previamente se ha de realizar una calibración a dos puertas. Una de las técnicas más utilizadas en estos casos es la TRL (*Transmission - Reflection - Line*) [3-7]. Los planos de referencia se puede localizar en la superficie de la muestra [5] o en la conexión de las antenas. En el primer caso hay que usar estándares de calibración en medio libre. En el segundo caso se puede utilizar estándares en guía rectangular, pero obliga a una segunda calibración con un conductor "perfecto" en lugar de la muestra y transmisión en vacío [3].

A continuación se puede realizar una transformación del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo para filtrar reflejos no deseados producidos en las antenas, en los bordes de la muestra y con otros elementos, [3, 5].

En la Figura 4 se presentan algunos resultados experimentales y de simulación obtenidos con un material quiral construido mediante una red periódica de manivelas conductoras en un sustrato de circuito impreso, similares a las propuestas en [8, 9]. Estas estructuras periódicas, presentan algunas ventajas sobre las distribuciones al azar: son más fáciles de fabricar, se obtiene mejor homogeneidad y presentan mejor comportamiento quiral [8]. En la primera fila se presentan los valores de las amplitudes de los coeficientes de reflexión, R, y los coeficientes de transmisión *copolar*, T_{CO} , y *crosspolar*, T_{CR} . En la segunda fila, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética. En la tercera, la quiralidad. La primera columna corresponde a resultados experimentales sin corrección en el dominio del tiempo (TD), la segunda a los resultados con la corrección TD y la tercera a los resultados obtenidos por simulación.

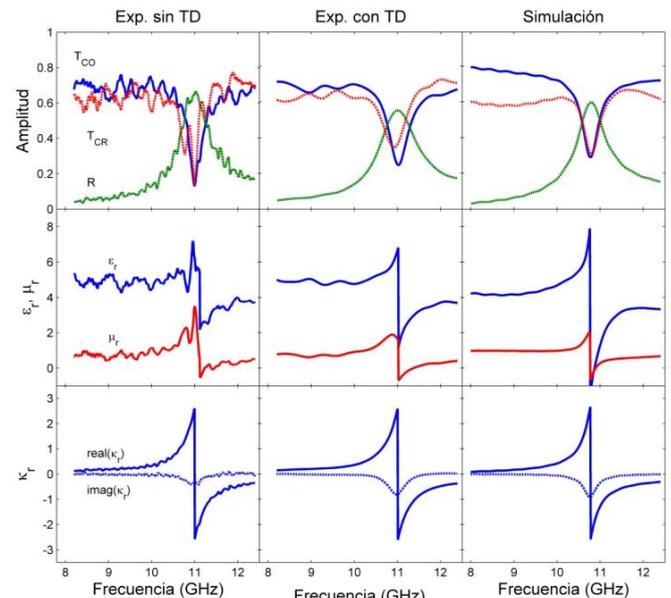


Fig. 4. Amplitudes de los coeficientes de reflexión y transmisión (primera fila), valores de permitividad y permeabilidad calculados a partir de los anteriores (segunda fila) y quiralidad relativa (tercera fila). Valores experimentales sin corrección TD (primera columna), con corrección TD (segunda columna) y obtenidos por simulación (tercera columna).

Como se puede observar, la aplicación de la corrección utilizando el filtrado TD elimina los rizados asociados a errores residuales, permitiendo mayor precisión en los valores de permitividad, permeabilidad y quiralidad calculados. También puede observarse una buena concordancia entre los valores medidos en laboratorio y los obtenidos mediante simulación numérica.

III. MEDIDAS EN GUÍA DE ONDA

La caracterización de materiales quirales utilizando guías de onda está basada en el mismo principio que las medidas en medio libre: es necesario medir tres magnitudes para obtener los tres parámetros característicos del material quiral. Estas tres magnitudes se obtienen midiendo un parámetro de reflexión y dos en transmisión, por lo que es necesario que el dispositivo experimental pueda medir, por lo menos, en dos polarizaciones distintas la onda transmitida. Por ello, siempre se utiliza guía circular que permite la propagación en cualquier polarización. En guía rectangular sólo se propaga el modo fundamental con polarización paralela al lado menor de la guía. Todas las técnicas descritas en la bibliografía [10-16] están representadas, con pequeñas variaciones, en la Fig. 5. La célula de medida con la muestra del medio bajo estudio (2, en la Fig. 5) es alimentada por una onda polarizada linealmente proveniente de una guía rectangular, adaptada a la guía circular por medio de un adaptador guía rectangular-guía circular (1, en la Fig. 5) y la onda transmitida es de nuevo adaptada a una guía rectangular por otro adaptador de forma que la guía rectangular puede girar alrededor del eje longitudinal (3 en la Fig. 5), permitiendo la medida para distintas polarizaciones. Entrada y salida son conectadas al analizador de redes a través de adaptadores guía rectangular-coaxial. Sun et al. [13] y Liu et al. [14] utilizan una guía ranurada para medir el coeficiente de reflexión para la muestra cortocircuitada y en transmisión en lugar de un analizador de redes. Los otros dos parámetros que utilizan son el ángulo de giro de la polarización y la razón axial (equivalente a la elipticidad). Reinert y Busse [10-11] acoplan la señal directamente desde los cables del analizador a la célula de medida a través de adaptadores coaxial-guía circular.

Las técnicas en guía tienen la ventaja de utilizar muestras más pequeñas y evitar cualquier problema de difracción y focalización. Por el contrario, presentan la desventaja de la aparición de varios modos propagantes en la guía llena de material, dificultando así la obtención de los parámetros del medio analizado en función de las magnitudes medidas (ecuaciones de inversión). Sun et al. [13] y Liu et al. [14] suponen que sólo se propaga el modo fundamental, por lo que llegan fácilmente a las ecuaciones de inversión. Reinert y Busse admiten cuatro modos propagantes y no pueden obtener ecuaciones de inversión. Resuelven el problema directo a partir de unos parámetros de material iniciales y ajustan a las magnitudes medidas mediante iteraciones sucesivas, conformando un análisis modal. Hollinger et al. [12] se quedan en la caracterización de los efectos del quiral sobre la propagación analizando resultados de dispersión rotatoria (giro de la polarización) y dicroísmo circular, y no estudian el proceso de inversión. Casi todos los trabajos incluyen una lámina resistiva en los adaptadores circular-rectangular para atenuar otros modos y acoplar sólo el

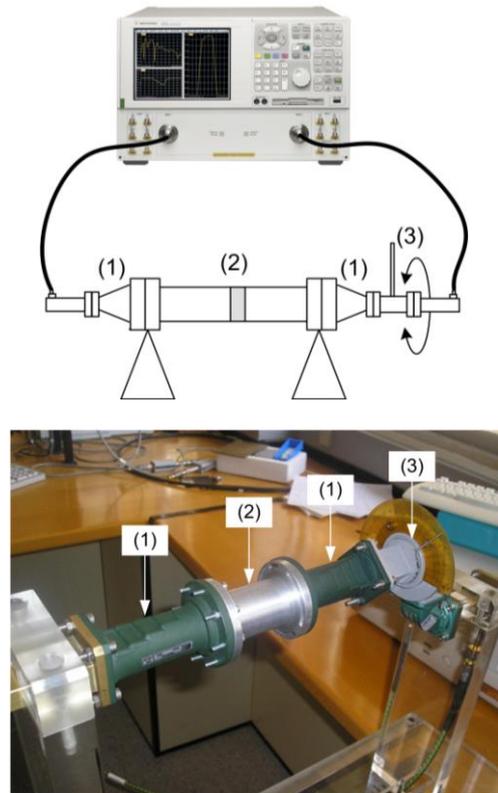


Fig. 5. Diagrama de un sistema de medida en guía (arriba) y fotografía del sistema utilizado por los autores (abajo). (1) adaptadores guía rectangular-guía circular, (2) célula de medida, (3) dispositivo giratorio que permite la medida del coeficiente de transmisión en cualquier dirección de polarización.

fundamental, pero en nuestras medidas hemos comprobado que provoca problemas de estabilidad de las medidas, resultando una técnica muy crítica.

Se puede revisar los resultados en las referencias indicadas y los resultados obtenidos por los autores en [16].

IV. MEDIDA EN RESONADORES

Se puede encontrar algunas referencias, ver por ejemplo [17], en las que se proponen técnicas de medida en resonadores cilíndricos utilizando teoría de perturbaciones. Las técnicas que utilizan resonadores suelen ser muy precisas pero desgraciadamente no parecen ser aplicables para la caracterización de materiales quirales. Por un lado, son técnicas de medida a frecuencias discretas poco útiles para medios dispersivos como son los quirales. Además, sólo es posible analizar dos magnitudes experimentales para cada modo de resonancia (frecuencia de resonancia y factor de calidad) por lo que sólo podría extraerse la quiralidad suponiendo conocidas la permitividad y la permeabilidad del material.

La alternativa sería disponer medidas en distintos modos, complicando extraordinariamente el proceso. Por otro lado, la teoría de perturbaciones sólo es válida para muestras de pequeño tamaño que en el caso de materiales quirales significa grandes inhomogeneidades. Creemos poco útiles este tipo de técnicas para la caracterización de quirales. De hecho, las referencias que se pueden encontrar sólo hacen análisis teóricos sin implementar la técnica.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha revisado las técnicas de medida de los parámetros característicos de medios quirales a frecuencias de microondas, analizando las técnicas en medio libre, en guías y en resonadores. Dado que para caracterizar los medios quirales se necesitan tres parámetros complejos, permitividad, permeabilidad y quiralidad será preciso medir, al menos, tres magnitudes experimentales lo que supone añadir una más en relación a las técnicas de caracterización usuales para materiales dieléctricos y magnéticos. Todas las técnicas de medida presentan un cierto grado de dificultad, pero las basadas en medio libre se presentan, hasta el momento, como las más fiables y simples. No se necesitan componentes especiales: cables, adaptadores coaxial-guía rectangular y antenas son elementos típicos en cualquier laboratorio de microondas. La propagación en la muestra se realiza en forma de onda plana con una determinada distribución de campo facilitando el análisis para la obtención de las ecuaciones de inversión. Las magnitudes medidas son los coeficientes de reflexión y transmisión en, al menos, dos polarizaciones distintas o magnitudes equivalentes. Presentan la dificultad del tamaño de la muestra y los problemas de difracción inherentes, pero se pueden resolver de forma satisfactoria utilizando elementos focalizadores, lentes o espejos, que concentran el haz incidente disminuyendo, por tanto, el tamaño de muestra necesario. También resulta muy interesante el uso de la corrección por transformada al dominio del tiempo (TD) para eliminar errores residuales debidos a problemas de calibración y a posibles reflexiones indeseadas.

La medida en guías parece una posible alternativa. También se usa como magnitudes medidas los coeficientes de reflexión y transmisión en dos polarizaciones. Presentan las ventajas de evitar todo tipo de interferencias externas y poder utilizar muestras pequeñas, aunque deben estar mecanizadas con precisión, pero presentan un problema con los modos propagantes en la guía con muestra, que suelen ser varios, dificultando así el análisis para la obtención de las ecuaciones de inversión. Sólo en el caso de un modo propagante puede obtenerse tales ecuaciones, pero eso ocurre únicamente para medios con valores muy pequeños de sus parámetros característicos. Otro problema de este tipo de técnicas son los componentes a utilizar. Todas las técnicas descritas se implementan en guía circular, ya que las guías rectangulares estándar no admiten propagación en polarización distinta a la del modo fundamental, por lo que no pueden observarse los efectos de dispersión rotatoria y dicroísmo circular. Los componentes en guía circular no son usuales en las redes comerciales, por lo que es necesario fabricarse los acopladores y los componentes necesarios. Una solución típica es el uso de elementos en guía rectangular con un adaptador guía rectangular-guía circular justo antes y después de la célula de medida, componente que existe comercialmente. Todos los autores utilizan adaptadores con una lámina resistiva paralela al lado mayor de la guía rectangular para evitar acoplamientos no deseados pero, según la experiencia de los autores, esta lámina genera problemas por reflexiones múltiples de modos superiores.

Finalmente, debemos decir que la técnica en resonadores es prácticamente testimonial. Sólo un grupo ha propuesto esta técnica, analizada teóricamente pero sin implementar en la práctica. Del propio estudio se comprueba incompatible con la realización práctica, ya que los resonadores conllevan

medir a frecuencias puntuales no adecuado para caracterizar medios dispersivos como los quirales. Además, la técnica propuesta está basada en teoría de perturbaciones, por lo que la muestra debería ser de pequeño tamaño lo que es incompatible con medios quirales homogéneos.

Como conclusión final proponemos la técnica en medio libre como la más viable para la caracterización de medios quirales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General de Investigación del MEC (Proyecto TEC 2010-21496-C03-02).

REFERENCIAS

- [1] I.V. Lindell, A.H. Sihvola, S.A. Tretyakov, A.J. Vitonen, *Electromagnetic Waves in Chiral Media*, Boston, USA: Artech House, 1994.
- [2] C.F. Bohren, "Light scattering by an optically active sphere", *Chemical Phys. Lett.*, Vol. 29, 458-462, 1974.
- [3] J. Muñoz, M. Rojo, A. Parreño, J. Margineda, "Automatic measurement of permittivity and permeability at microwave frequencies using normal and oblique free-wave incidence with focused beam," *IEEE Trans. Instrum. Measure.*, Vol. 47, No. 4, 886-892, 1998.
- [4] D.K. Ghodgaonkar, V.V. Varadan, V.K. Varadan, "A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangent at microwave frequencies", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 38, 789-793, 1989.
- [5] L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan, *Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 2004.
- [6] R. Ro, V.V. Varadan, V.K. Varadan, "Electromagnetic activity and absorption in microwave composites", *Proc. Inst. Elect. Eng. H*, Vol. 139, No. 5, 441-448, 1992.
- [7] F.J. Sánchez López, A.J. García-Collado, G.J. Molina-Cuberos, M.J. Núñez, "Algoritmo para la caracterización unívoca de metamateriales basados en inclusiones quirales" XXVI Congreso Nacional de la URSI, Leganés, 2011.
- [8] G.J. Molina-Cuberos, A.J. García-Collado, I. Barba, J. Margineda, "Chiral Metamaterials With Negative Refractive Index Composed by an Eight-Cranks Molecule," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett.*, Vol. 10, 1488-1490, 2011.
- [9] 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.
- [10] J. Reinert, G. Busse, A.F. Jacob, "Waveguide Characterization of Chiral Material: Theory", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, No 3, 290 - 296, 1999.
- [11] G. Busse, J. Reinert, A.F. Jacob, "Waveguide characterization of chiral material: experiments", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, No 3, 297 - 301, 1999.
- [12] R.D. Hollinger, V.V. Varadan, D.K. Ghodgaonkar, V.K. Varadan, "Experimental Characterization of Isotropic Composites in Circular Waveguides", *Radio Science*, Vol. 27, No. 2, 161-168, 1992.
- [13] G. Sun, K. Yao, Z. Liu, Q. Huang, "A Study on measuring the Electromagnetic Parameters of Chiral Materials", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 31, 2109-2111, 1998.
- [14] Z. Liu, G. Sun, Q. Huang, K. Yao, "A Circular Waveguide Method for Measuring the Electromagnetic Parameters of Chiral Materials at Microwave Frequencies", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 10, 374-379, 1999.
- [15] C.R. Brewitt-Taylor, P.G. Lederer, F.C. Smith, S. Haq, "Measurement and Prediction of Helix-Loaded Chiral Composites", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 47, No 4, 692-700, 1999.
- [16] I. Barba et al, "Quasi-planar Chiral Materials for Microwave Frequencies", en *Electromagnetic Waves Propagation in Complex Matter*, Kishk A. ed., Intech ISBN 978-953-307-445-0, 2011. (<http://www.intechopen.com/books/electromagnetic-waves-propagation-in-complex-matter>)
- [17] S.A. Tretyakov, A.J. Viitanen, "Waveguide and resonator perturbation techniques measuring chirality and nonreciprocity parameters of biisotropic materials", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 43, No. 1, 222-225, 1995.