

Trabajo Fin de Carrera



Licenciatura de Física

**Caracterización experimental de
metamateriales quirales basados en
tecnología de circuito impreso a frecuencias
de microondas.**

FACULTAD DE CIENCIAS

JULIO 2014

Autor: Raúl Ruiz Fernández
Directores: Óscar Fernández Fernández
Álvaro Gómez Gómez

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para tener un recuerdo para todas aquellas personas que han estado presentes en mi vida apoyándome y ayudándome a lo largo de estos últimos años.

En primer lugar quería agradecer a mi familia y amigos, por permanecer a mi lado mostrándome su apoyo tanto en los buenos momentos como en los menos buenos, en especial a mis padres por mostrarme todo su cariño, educarme y desarrollarme como persona, así como por hacer posible mi idea de estudiar la licenciatura de física.

En segundo lugar, una mención especial para mis directores de trabajo de fin de carrera Óscar Fernández y Álvaro Gómez, por darme la oportunidad de desarrollar esta investigación, asesorarme y poner todo de su parte aportando toda su experiencia.

Y por último, no quería dejar la ocasión para tener un recuerdo para todas aquellas personas que, en mayor o menor medida, han compartido parte de su tiempo conmigo a lo largo de la licenciatura.

Índice

Capítulo 1: Introducción	1
Capítulo 2: Metamateriales Quirales	3
2.1 Metamateriales.....	3
2.2 Materiales Quirales.....	7
2.3 Solución matemática para un medio ilimitado.	9
2.4 Metamateriales Quirales	10
2.5 Aplicaciones	10
Capítulo 3: Software empleado	13
3.1 Agilent EMPro 3D EM Simulation Software.....	13
3.2 Algoritmo de recuperación de parámetros.....	15
Capítulo 4. Resultados.....	18
4.1 Estructuras analizadas.....	18
4.1.1 Estructura Cruces.....	18
4.1.2 Estructura Eles.....	27
4.2 Estructura creada	35
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras	39
Anexo I:	41
Referencias	43

Capítulo 1: Introducción

En los últimos años, dentro de la comunidad científica, y especialmente en el campo de la ingeniería de comunicaciones, ha surgido un gran interés relacionado con el estudio de nuevos materiales que presentan propiedades que no se encuentran disponibles en la naturaleza. Entre estos medios destacan los metamateriales (MTM)[1].

Generalmente el término metamaterial, hace referencia a los materiales doblemente negativos (DNG), caracterizados por tener simultáneamente $\epsilon < 0$ y $\mu < 0$ [2], y cuya característica más importante, es la capacidad de producir refracción negativa.

La consecución simultánea de valores negativos de ϵ y μ es un factor condicionante, sobre todo a frecuencias ópticas debido a la dificultad para conseguir permeabilidad negativa. Pendry en [3] plantea la consecución de índices de refracción negativo mediante el uso de medios quirales con alta actividad óptica, sin necesidad de que permitividad y permeabilidad sean simultáneamente negativas. Este tipo de materiales se denominan metamateriales quirales (MTMQ) y potencian las propiedades propias de los medios quirales, presentando valores muy elevados de rotación del plano de polarización [4] (los cuales permiten obtener $n < 0$) y/o alto dicroísmo circular.

En los últimos años, se han realizado grandes avances en los MTMQ, en particular con los implementados en circuito impreso, dada su facilidad de fabricación. Entre los diversos trabajos publicados, este trabajo se ha centrado en los realizados sobre las estructuras formadas por cruces [5] y por Eles [6]. Ambas estructuras presentan quiralidad pero con distribuciones geométricas diferentes.

Para facilitar el diseño de dispositivos o aplicaciones basadas en estos MTMQ, es necesario conocer con detalle como depende su respuesta electromagnética de los parámetros geométricos. Así por tanto, este trabajo tiene como objetivo realizar una caracterización paramétrica de las estructuras seleccionadas: “Cruces” y “Eles”. Para ello, se analiza las variaciones de las diferentes propiedades de las estructuras (rotación, elipticidad o el índice de refracción) en el dominio de la frecuencia, como consecuencia de la modificación de sus parámetros geométricos.

Un segundo objetivo de este trabajo es proponer y estudiar una nueva estructura MMTQ en circuito impreso que aporte mejoras significativas sobre las estudiadas previamente.

La memoria se ha estructurado de la siguiente manera:

- El capítulo 2 revisa de forma detalla, los diferentes conceptos empleados a lo largo del trabajo. Se comienza con el concepto metamaterial; se expone su definición así como las diferentes propiedades que lo caracterizan. A continuación se introducen las nociones básicas relativas a los materiales quirales. Posteriormente se realiza un repaso histórico de la evolución que han sufrido los MMTQ y finalmente, debido al gran interés de estos medios suscitado por sus potenciales aplicaciones, se exponen las más importantes.
- El siguiente capítulo hace referencia a las distintas herramientas software que se han empleado para llevar a cabo el presente trabajo. Por un lado, se destaca el simulador electromagnético Agilent EMPro 3D, herramienta comercial basada en el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), utilizado para la resolución de los problemas electromagnéticos planteados. Por otro lado, el algoritmo de recuperación de parámetros, que nos ha permitido obtener los diferentes parámetros que caracterizan las estructuras coeficientes de transmisión y reflexión, rotación, dicroísmo circular, y parámetros característicos.
- En el capítulo 4, se presentan las estructuras a estudiar y los resultados más significativos obtenidos al realizar el estudio paramétrico. Dicho estudio paramétrico evalúa la influencia de los parámetros geométricos sobre las propiedades electromagnéticas de la estructura con el objetivo de determinar qué configuración geométrica de la estructura registra los mayores valores de rotación del plano de polarización, de dicroísmo circular, y/o índice de refracción negativo. Asimismo en esta sección, se presenta un nuevo MMTQ plano sobre circuito impreso entre cuyas propiedades destaca la alta rotación del plano de polarización y un comportamiento multibanda.
- Finalmente se presentan las diferentes conclusiones que se han obtenido tras realizar el estudio y se sugieren próximas metas a alcanzar en futuros trabajos.

Capítulo 2: Metamateriales Quirales

2.1 Metamateriales

El término metamaterial (MTM), según la REME (Red Española de Metamateriales), alude a una estructura o medio artificial que, en un determinado rango de frecuencias, presenta propiedades electromagnéticas singulares (inusuales) [7]. Y entre estas características, como se verá posteriormente, se puede encontrar la propagación de retroceso, la refracción negativa o la presencia de bandas prohibidas.

Los metamateriales son materiales de “reciente” creación, cuyos orígenes se remontan a finales del siglo XIX. En esa época muchos de los artículos publicados hacían referencia a dieléctricos artificiales. En concreto, en un trabajo, J. Chunder Bose en 1898 [8], muestra la fabricación de un medio quiral mediante fibras capaz de rotar el plano de polarización de una onda electromagnética.

En los primeros años del siglo XX no se produjeron demasiados avances en este campo hasta 1968, cuando Victor Veselago desarrolló los primeros estudios teóricos sobre los medios doblemente negativos (DNG) [9], convirtiéndose en el gran impulsor de este tipo de materiales. Su gran aportación, fue la demostración de que en este tipo de medios el vector de Poynting y la propagación de onda tienen direcciones contrarias, hecho que veremos desarrollado posteriormente.

A partir de los trabajos de Vesalago, se inició una corriente de diversas investigaciones sobre este tipo de materiales. De entre ellas se destaca la llevada a cabo por Yablonovitch en 1987, donde se propuso un nuevo material, el *photonic bandgap* (PBG) [10]. Este cristal era capaz de rechazar la propagación de las ondas electromagnéticas en su interior para ciertas bandas de frecuencia, mientras que permitía su transmisión para el resto de las bandas.

En el año 1999, Pendry *et al.* [11] protagonizaron uno de los avances clave en el campo de los metamateriales al diseñar una estructura periódica compuesta por dos conjuntos de elementos, (ver Fig. 1), que permitía alcanzar simultáneamente una permitividad y permeabilidad negativas.

El primer grupo de elementos, constituido por un conjunto de varillas metálicas finas, se comporta como un resonador eléctrico, caracterizado por un $\varepsilon < 0$. Estas varillas pueden trabajar en diferentes zonas de frecuencia, modificando tanto su geometría como su disposición. El otro conjunto, está conformado por anillos metálicos que cuentan con una separación en el interior que les otorga una actividad magnética, $\mu < 0$. Estos anillos se denominan anillos resonadores (Split-ring resonator, SRR). Y, al igual que ocurre con las varillas, se pueden emplear para diferentes bandas de frecuencias.

Por tanto, mediante un diseño adecuado de varillas y de anillos, que determinen una permitividad y permeabilidad negativos en el mismo ancho de banda, se obtiene un índice de refracción negativo.

El desarrollo propuesto por Pendry fue llevado a cabo un año más tarde por Smith *et al.* [12], poniendo de manifiesto la existencia de la refracción negativa.



Figura 1: Imagen correspondiente al metamaterial propuesto por Pendry y fabricado por Smith [13].

Algunas de las propiedades más significativas de los materiales son las siguientes:

- *Dirección de propagación de las ondas electromagnéticas opuesta al vector de Poynting.*

Los materiales doblemente negativos (DNG), también son conocidos como materiales zurdos (LH) debido al triedro zurdo formado por los vectores campo eléctrico, campo magnético y el vector de onda \vec{k} (Fig. 2b).

Este hecho se puede demostrar resolviendo el problema de propagación en medio libre cuya solución para una onda plana¹ viene dada por [15]:

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega |\mu| \vec{H} \quad (2.1)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = +\omega |\varepsilon| \vec{E} \quad (2.2)$$

¹ La propagación del campo eléctrico tiene una dependencia temporal de la forma $e^{j\omega t}$.

Otra conclusión a la que se llega para este tipo de medios es que la velocidad de fase es negativa, contraria a los materiales doblemente positivos (DPS), para los cuales $\varepsilon > 0$ y $\mu > 0$.

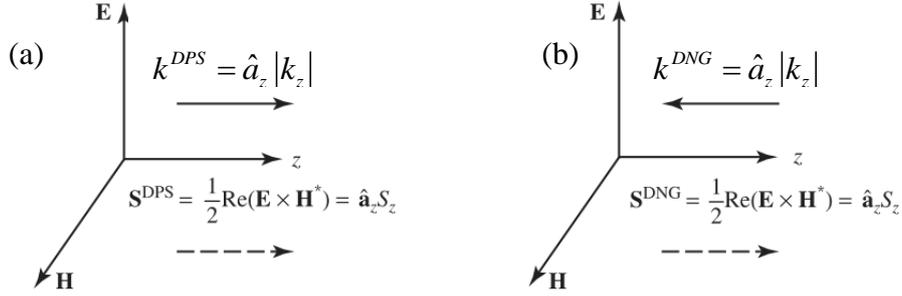


Figura 2: Comparativa entre los vectores de Poynting y de propagación de una onda electromagnética en dos materiales diferentes, (a) material DPS (b) material DNG [14].

En la propagación de medio libre, la constante de propagación, β , es igual que el número de onda, k , por lo que:

$$k^2 = \beta^2 = \varepsilon\mu \frac{\omega^2}{c^2} \quad (2.3)$$

siendo ε la permitividad relativa, μ la permeabilidad relativa, ω la frecuencia angular de la onda y $c = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ la velocidad de la luz en el vacío. Además:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\omega/v}{\omega/c} = \frac{k}{k_0} = \pm \sqrt{\varepsilon\mu} \quad (2.4)$$

donde v es la velocidad de fase en el medio y $k_0 = \omega/c$ es el número de onda en el medio libre. La ecuación (2.4) plantea dos posibilidades para el índice de refracción, una positiva y otra negativa. En el caso de los medios DPS se obtiene un índice de refracción positivo, mientras que en los casos DNG es negativo.

- Ley de Snell inversa.

La refracción negativa es una de las propiedades más conocidas de los metamateriales. Considerando estos medios, la ley de Snell sigue siendo válida, salvo la modificación del ángulo de refracción que se invierte respecto a la situación convencional:

$$s_1 |n_1| \sin \theta_1 = s_2 |n_2| \sin \theta_2 \quad (2.5)$$

donde los subíndices numéricos indican los distintos medios, s_i representa el signo del tipo de medio i (+1 para medios DPS y -1 en los DNG) y θ los ángulos de incidencia y refracción.

Por tanto, en el caso de disponer un medio 1 del tipo DPS y un medio 2 DNG, el ángulo de refracción es de la forma:

$$\theta_2 = -\arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right) \quad (2.6)$$

A la vista de este resultado, queda demostrado el comportamiento inusual que presenta este tipo de medios en relación a la ley de Snell.

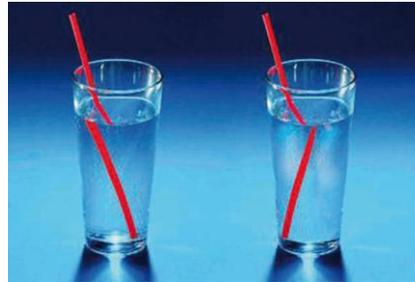


Figura 3: Efecto de la refracción negativa para una pajita en el interior de un vaso. [16]

- *Bandas prohibidas.*

Las propiedades electromagnéticas presentes en los metamateriales dan lugar a medios de transmisión que presentan una velocidad de fase en sentido contrario a la velocidad de grupo, como ya se ha comentado. Como consecuencia a este fenómeno, estos materiales permiten sintetizar respuestas “paso banda”, lo que significa que dejan pasar un determinado rango de frecuencias de una señal (banda de paso) y atenúan el resto (banda de rechazo).

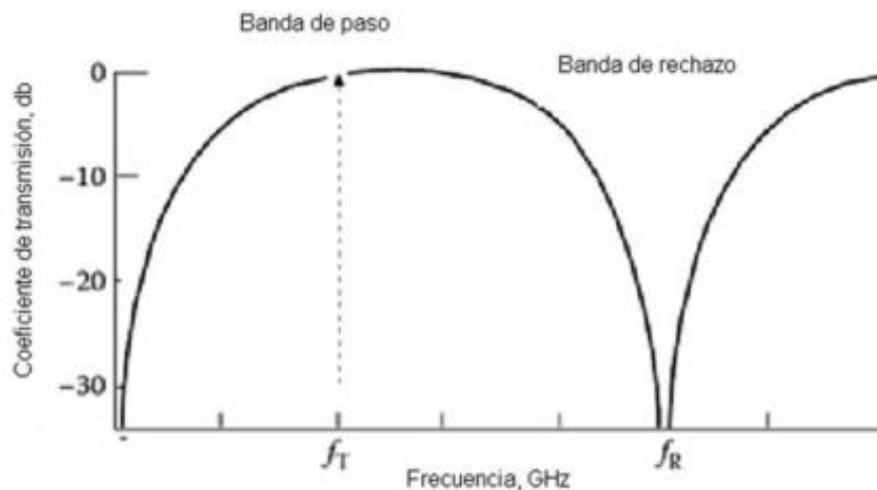


Figura 4: Muestra una respuesta típica de coeficientes de transmisión de un array de conductores. La frecuencia de resonancia se denomina f_R , y f_T como el comienzo de la banda de paso.

2.2 Materiales Quirales

El término quiralidad, proviene de la palabra griega “quiros” que significa mano, y hace referencia a la propiedad que poseen ciertos objetos por la cual su imagen especular, denominada enantiomero, no es coincidente con ellos mismos, mediante operaciones de traslación y rotación.

Los materiales quirales pertenecen a un grupo más amplio de medios que reciben el nombre de materiales bi-isotropos. Su principal característica es el acoplamiento entre el campo eléctrico y magnético que producen, el cual viene descrito por la inclusión de dos nuevos parámetros en las relaciones de constitución, el parámetro de Pasteur o quiralidad, κ y el parámetro de Tellegen o reciprocidad, χ , [17].

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} + \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} (\chi - j\kappa) \vec{H} \quad (2.7)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} (\chi + j\kappa) \vec{E} \quad (2.8)$$

De acuerdo al valor de los parámetros que aparecen en las relaciones de constitución, los medios bi-isotropos se pueden clasificar como:

	No-quiral $\kappa = 0$	Quiral $\kappa \neq 0$
Reciprocidad $\chi = 0$	Medio Isótropo	Medio Pasteur
No-reciprocidad $\chi \neq 0$	Medio Tellegen	Medio general bi-isotropo

Tabla 1. Clasificación de los medios Bi-isótropo.

Por tanto, particularizando las relaciones de constitución (2.7) y (2.8) para los medios quirales ($\chi = 0$ y $\kappa \neq 0$) [18],[19], se obtiene:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} - j\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \vec{H} \quad (2.9)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + j\kappa \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \vec{E} \quad (2.10)$$

Las principales propiedades de los materiales quirales son las siguientes:

- *Dispersión Óptica Rotatoria (ORD)*.

La dispersión óptica rotatoria es la propiedad del medio quiral para producir un giro en el plano de polarización de una onda linealmente polarizada que lo atraviesa [19], como se puede ver en la siguiente figura.

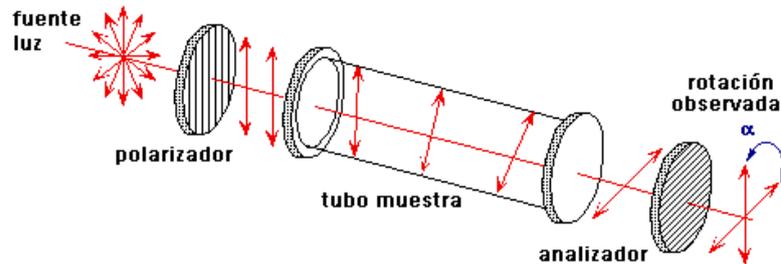


Figura 5: Esquema de la rotación del plano de polarización sufrida por una onda lineal al atravesar una muestra de un material ópticamente activo.

- *Dicroísmo circular (CD)*.

El dicroísmo circular hace referencia a la diferente absorción sufrida por las ondas circularmente polarizadas a derechas (CPD) y a izquierdas (CPI) [19]. Una onda linealmente polarizada, se puede descomponer en dos ondas una CPD y otra CPI ambas con la misma amplitud. El dicroísmo circular produce un cambio de magnitud diferente para cada onda circular, lo que supone la modificación de la polarización de la onda a la salida del medio.

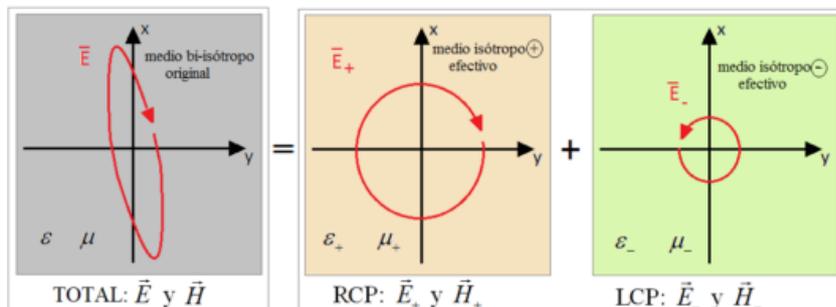


Figura 6: Esquema de la descomposición del campo electromagnético total en dos campos electromagnéticos, uno elípticamente polarizado a derechas (RCP) y otro a izquierdas (LCP).

2.3 Solución matemática para un medio ilimitado.

En los medios quirales, debido a sus propiedades, la onda que se transmite en su interior se puede descomponer como dos ondas circularmente polarizadas, una onda a derechas (CPD) y otra a izquierdas (CPI), [1], [6], [21].

Para su demostración, se parte de las relaciones de constitución (2.9) y (2.10), que junto con las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia proporcionan la ecuación de onda:

$$\vec{k} \times (\vec{k} \times \vec{E}) = -k_0^2 (\epsilon\mu - \kappa^2) \vec{E} + 2j\kappa k_0 (\vec{k} \times \vec{E}) \quad (2.11)$$

Al resolver la ecuación (2.11) se obtienen dos modos propios asociados cada uno de ellos a un autovalor. Uno se corresponde con una CPD (+) y el otro con una CPI (-):

$$\vec{E}_{\pm}(\mathbf{z}) = (x \pm jy) E_0 e^{-j\beta z} \quad (2.12)$$

$$k_{\pm} = k_0 (n \pm \kappa) \quad (2.13)$$

A partir de la ecuación (2.13) se calcular el parámetro de quiralidad como:

$$\kappa = \frac{k_+ - k_-}{2} \quad (2.14)$$

Por último, por analogía con el caso general, se puede definir el índice de refracción tanto para la CPD como para la CPI:

$$n_{\pm} = \frac{k_{\pm}}{k_0} = (n \pm \kappa) \quad (2.15)$$

Prestando atención a la ecuación (2.13) en el caso en que $|\kappa| > n$, se puede obtener un índice de refracción negativo para una de las polarizaciones.

2.4 Metamateriales Quirales

Los metamateriales quirales son medios que se han desarrollado durante el siglo XXI por lo que en esta sección se va a realizar un breve repaso de los acontecimientos más destacados relacionados en este campo [22].

Esta corriente comenzó en 2003, cuando Tretyakov *et al.* propusieron la posibilidad de alcanzar la refracción negativa mediante materiales quirales nihilíticos [23], los cuales poseen unos valores de la permitividad y la permeabilidad cercanos a cero.

Un año más tarde en 2004, Pendry analizó la posibilidad de lograr esa refracción negativa a partir del uso de materiales quirales [3]. De sus estudios llegó a la conclusión de que no era necesario registrar ni una permitividad negativa, ni una permeabilidad negativa simultáneamente, lo cual presenta una gran ventaja frente a los metamateriales tradicionales.

Recientemente Wang *et al.* [24], demostraron que a través de los materiales quirales no sólo se podía conseguir un índice de refracción negativo sino también obtener altos valores de la actividad óptica y de dicroísmo circular.

En la actualidad numerosos grupos de investigadores se encuentran trabajando en este campo. Entre ellos destaca Rogacheva *et al.* [25], ya que fueron capaces de alcanzar una actividad óptica muy alta para materiales quirales de doble cara realizados en circuito impreso. Este tipo de materiales quirales han sido una revolución y el punto de partida para muchas estructuras como cruces [5] y por Eles [6], estructuras centrales de este proyecto.

2.5 Aplicaciones

En esta última década ha surgido un gran interés en los metamateriales quirales, debido al hecho de que mediante su fabricación, de forma más sencilla, se pueden lograr las potenciales aplicaciones características de los metamateriales, algunas de ellas con gran interés hoy en día [16]. A continuación se presentan algunas de estas aplicaciones.

- *Mejora de las prestaciones de los dispositivos de microondas.*

Una de las utilizaciones de más éxito de los metamateriales es su empleo en los distintos dispositivos de microondas, ya sean antenas, filtros, amplificadores... lo que ha permitido obtener nuevos componentes o mejorar los ya existentes.

Una de las mejoras obtenidas es la de miniaturización de los componentes, los cuales están basados en elementos resonantes. Por este motivo, se condiciona su longitud física, hecho que puede ser solventado mediante la utilización de materiales zurdos.

Los LH también se pueden emplear para mejorar la ganancia de las antenas, lo que se traduce en un aumento de direccionalidad, obteniendo un efecto de enfoque de la radiación de la antena. Además, se estudia la posibilidad de construir superficies capaces de seleccionar diferentes frecuencias.

- *Superresolución: la lente perfecta.*

Los sistemas convencionales poseen lo que se conoce como límite de difracción, es decir, la imposibilidad de discriminar objetos cuyos tamaños sean menores que la longitud de onda con las que son iluminados. Teóricamente con la utilización de metamateriales este límite desaparecería, ya que pueden amplificar las ondas evanescentes de los sistemas ópticos. De esta manera, dichas ondas tendrían energía suficiente para alcanzar el sistema óptico que reproduce la imagen y por lo tanto, sería posible reconstruir perfectamente la imagen original (Fig. 7).

La superresolución, además de al ámbito óptico también abarca a los sistemas electromagnéticos o acústicos teniendo grandes aplicaciones en cada uno de esos ámbitos.

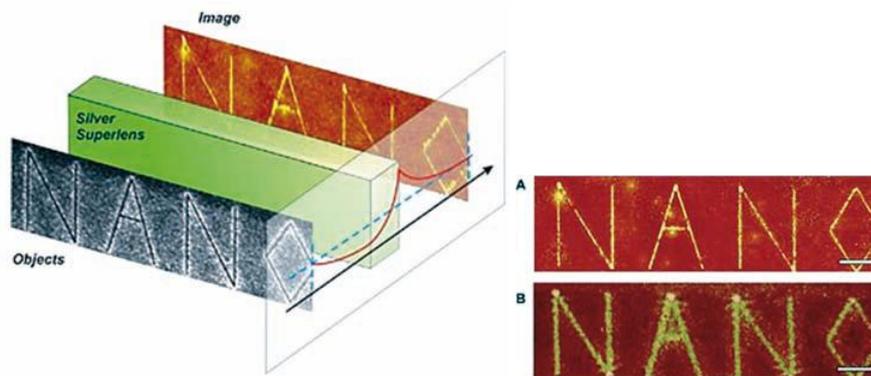


Figura 7: Ejemplo de superlente mediante la utilización de un metamaterial.

- *Encubrimiento o invisibilidad.*

El concepto de invisibilidad comúnmente hace referencia a la indetectabilidad en el espectro del visible, aunque se puede extender esa definición para cualquier rango del espectro electromagnético.

La vía de investigación para lograr el encubrimiento es la siguiente: los objetos son detectados debido a que producen una reflexión de las ondas que inciden sobre ellos, además de proyectar una sombra. Por tanto, para ser indetectables se debe de eliminar tanto la reflexión como la sombra. El procedimiento a seguir para conseguir dicho efecto es recubrir el objeto con una capa de material capaz de curvar las ondas electromagnéticas, de tal manera que dichas ondas rodeen al objeto y salgan de la misma forma que incidieron sobre él (ver Fig. 8):

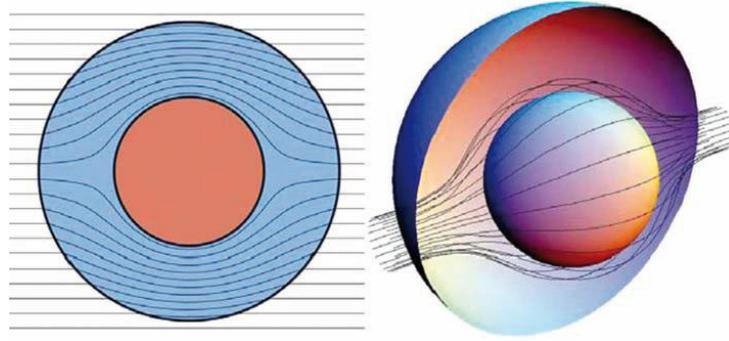


Figura 8: Esquema de un objeto invisible donde los rayos inciden y abandonan el material de la misma forma.

Capítulo 3: Software empleado

3.1 Agilent EMPro 3D EM Simulation Software

Una vez presentados los diferentes conceptos teóricos empleados en este trabajo, se procede en esta sección, a comentar las diferentes herramientas informáticas que se utilizan para realizar la caracterización paramétrica de las diferentes estructuras.

Con este objetivo, el software Agilent EMPro 3D EM Simulation Software [26], es el entorno empleado para la simulación de las estructuras. Se trata de un programa capaz de analizar los efectos electromagnéticos en alta frecuencia producidos por sistemas en 3 dimensiones. Este software permite realizar tanto el modelado de estructuras, como la simulación y la presentación de resultados. La fig. 7 muestra una captura del interface gráfico del software Empro.

En primer lugar con esta herramienta se modela la estructura deseada mediante la composición de diferentes estructuras geométricas elementales (rectángulos, cilindros, conos,...), y/o realizando simetrías. Una vez creado el diseño se definen y asignan los materiales de los cuales está compuesto el MTMQ.

Aunque el MTMQ es una estructura periódica, únicamente se simula una celda unidad compuesta por un dieléctrico y las metalizaciones en ambas caras. Como condiciones de contorno se aplican condiciones periódicas en las direcciones transversales a la dirección de la propagación de la onda (ejes x e y) emulando así la periodicidad de la estructura. En el eje z , dirección normal a la estructura en la que se propagará la onda, se aplican condiciones de contorno absorbentes.

Una vez terminado el diseño de la celda, se definen los sensores que se van a emplear. Por un lado dos sensores de punto, uno a cada lado de la estructura. Uno se encargará de medir el campo total antes de la estructura y el otro el campo transmitido. Asimismo, se disponen los sensores de superficie, con los que se obtendrá la distribución de corriente superficial.

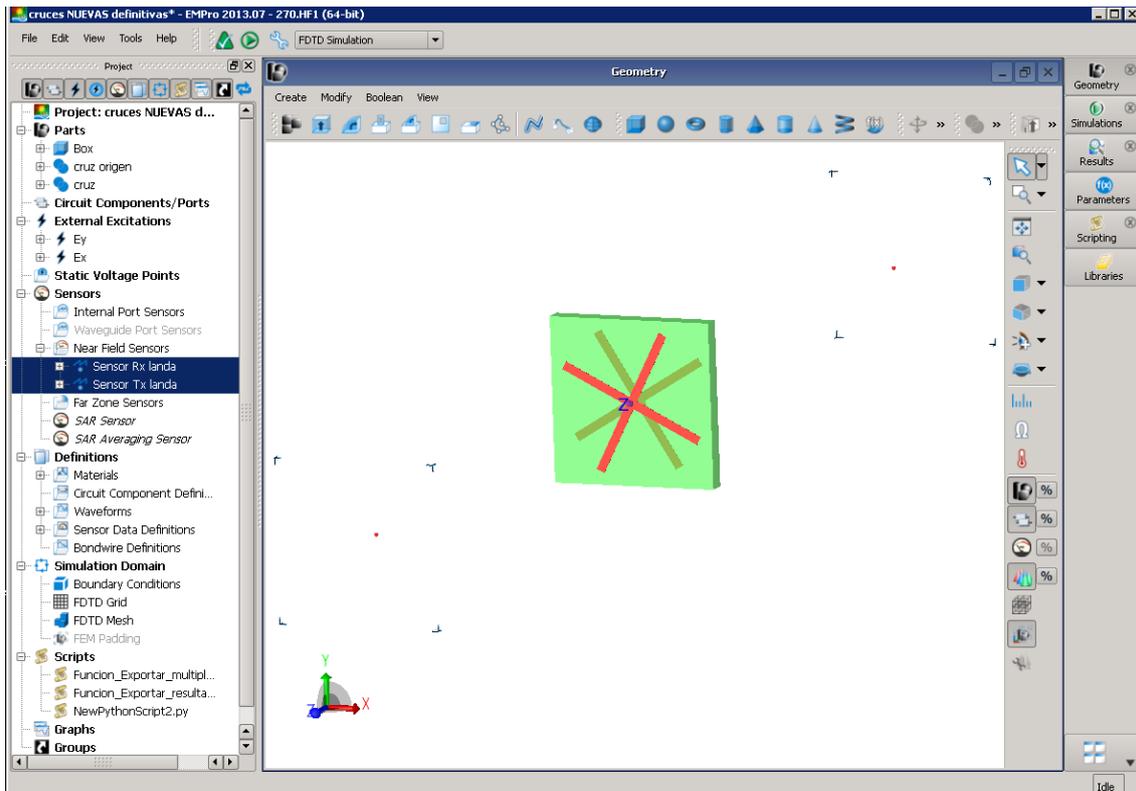


Figura 9: Captura de pantalla Agilent EMPro 3D EM Simulation Software.

A continuación se determinan las dos excitaciones correspondientes a la onda electromagnética plana que se van a emplear, una con polarización lineal en el eje y , E_y y otra en el eje x , E_x . La dirección de propagación de ambas excitaciones es $+z$.

Empro dispone de dos motores de simulación, uno basada en el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) y otro el método de elementos finitos (FEM) en el dominio de la frecuencia. En trabajo se ha utilizado FDTD, por lo tanto es necesario realizar un mallado adecuado tanto de la estructura como del medio libre que lo rodea.

El mallado aplicado a la estructura ha sido de 0.004λ , siendo λ la longitud de onda en el vacío para la máxima frecuencia a analizar. El grid del espacio libre ha sido de 0.01λ en el eje z y 0.02 en los ejes x e y .

Para caracterizar una estructura es necesaria la realización de tres simulaciones. La primera de las simulaciones se corresponde con la excitación de la onda en el eje y , (E_y), la segunda en el eje x , (E_x), y por último se vuelve a simular sustituyendo la estructura por vacío. De los resultados obtenidos, se extrae el campo eléctrico incidente, el reflejado y el reflejado en función del tiempo. A partir de ellos, se determinan los coeficientes de transmisión y de reflexión de una onda linealmente polarizada, los cuales mediante la correspondiente se convierten en coeficientes de transmisión y reflexión de una onda circularmente polarizada a derechas y a izquierdas (ver anexo 1). A partir de estos coeficientes de transmisión y reflexión se obtienen los diferentes parámetros de la estructura, tanto los relativos a la quiralidad (rotación, elipticidad y

dicroísmo circular) como los parámetros característicos de la misma (índice de refracción, quiralidad, permitividad y permeabilidad) mediante un algoritmo de recuperación de parámetros; dicho algoritmo se detalla en el apartado siguiente.

3.2 Algoritmo de recuperación de parámetros

La recuperación de parámetros dentro del estudio de metamateriales, es una técnica muy importante para la caracterización de sus propiedades electromagnéticas, a partir de los coeficientes de transmisión y reflexión de la estructura. A continuación se expone, de forma resumida, el desarrollo matemático seguido por esta técnica [21].

Partiendo del problema de tres medios (ver Fig. 10), situación en la que se dispone un MTMQ en el vacío.

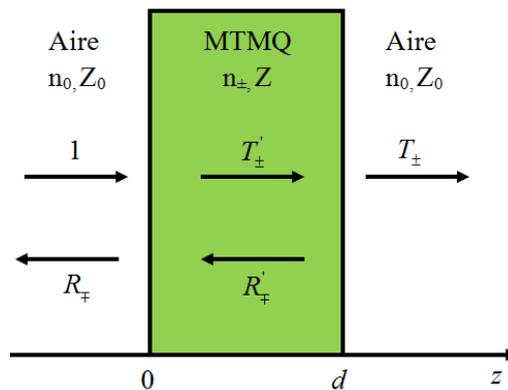


Figura 10: Esquema de la transmisión y reflexión para una onda plana que incide sobre MTMQ en el sentido creciente de z .

Para la resolución del problema se van a considerar ondas planas circularmente polarizadas que inciden normalmente sobre la superficie del MTMQ de anchura d , que presenta un índice de refracción n_{\pm} y una impedancia $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$. Como amplitud de la onda incidente se toma la unidad, mientras que las amplitudes de las ondas transmitida y reflejada vienen determinadas por T_{\pm} y R_{\mp} respectivamente. En el interior de la estructura tenemos múltiples reflexiones siendo representadas la transmisión por T'_{\pm} y la reflexión por R'_{\mp} .

Aplicando las condiciones de contorno en la primera interfase ($z=0$), se obtiene:

$$1 + R_{\mp} = T'_{\pm} + R'_{\mp} \quad (3.1)$$

$$1 - R'_{\mp} = \frac{T'_{\pm} - R'_{\mp}}{Z} \quad (3.2)$$

Y en la segunda interfase ($z = d$):

$$T'_{\pm} e^{-jk_{\pm}d} + R'_{\mp} e^{jk_{\mp}d} = T_{\pm} \quad (3.3)$$

$$\frac{T'_{\pm} e^{-jk_{\pm}d} - R'_{\mp} e^{jk_{\mp}d}}{Z} = T_{\pm} \quad (3.4)$$

donde k_{\pm} es el número de onda para cada una de las polarizaciones. Eliminando de las ecuaciones anteriores T' y R' , y teniendo en cuenta que $k_{+} + k_{-} = 2nk_0$, se obtienen los coeficientes de transmisión y de reflexión, para cada una de las polarizaciones:

$$T_{\pm} = \frac{4Ze^{jnk_0d} e^{\mp jk_0d}}{(1+Z)^2 - (1-Z)^2 e^{-2jnk_0d}} \quad (3.5)$$

$$R_{\mp} = \frac{(1-Z^2)(e^{-2jnk_0d} - 1)}{(1+Z)^2 - (1-Z)^2 e^{-2jnk_0d}} \quad (3.6)$$

A partir de la ecuación (3.6) se observa que $R_{+} = R_{-}$. Además como se muestra en la Fig. 10 las CPD y CPI intercambian la polarización al producirse una reflexión, por lo que los efectos producidos por la estructura sobre la onda electromagnética al final serán los mismos.

Una vez determinados los coeficientes de transmisión y de reflexión se obtienen matemáticamente la rotación, θ , el dichroísmo circular, Δ y la elipticidad η de la siguiente forma [5]:

$$\Delta = |T_{+}|^2 - |T_{-}|^2 \quad (3.7)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{|T_{+}|^2 - |T_{-}|^2}{|T_{+}|^2 + |T_{-}|^2} \right) \quad (3.8)$$

$$\theta = \frac{1}{2} [\arg(T_{+}) - \arg(T_{-})] \quad (3.9)$$

Por otro lado, definiendo $T = \sqrt{T_{+}T_{-}}$ y recordando que $R = R_{\mp}$, las ecuaciones (3.5) y (3.6), se transforman en:

$$T = \frac{4Ze^{-jnk_0d}}{(1+Z)^2 - (1-Z)^2 e^{-2jnk_0d}} \quad (3.10)$$

$$R = \frac{(1 - Z^2)(e^{-2jnk_0d} - 1)}{(1 + Z)^2 - (1 - Z)^2 e^{-2jnk_0d}} \quad (3.11)$$

Operando matemáticamente con las ecuaciones anteriores se obtiene la impedancia, Z , y el índice de refracción n_{\pm} :

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1 + R)^2 - T_+ T_-}{(1 - R)^2 - T_+ T_-}} \quad (3.12)$$

$$n_{\pm} = \frac{-j}{k_0 d} \left\{ \ln \left[\frac{1}{T_{\pm}} \left(1 - \frac{Z - 1}{Z + 1} R \right) \right] \pm 2m\pi \right\} \quad (3.13)$$

donde m es un número entero por determinar. El signo de la raíz y el término m se eligen atendiendo al principio de conservación de la energía, es decir considerando las siguientes condiciones:

$$\text{Re}(Z) \geq 0 ; \text{Im}(n) < 0 \quad (3.14)$$

Finalmente, una vez definidos los parámetros Z y n_{\pm} , el resto de parámetros resultan de las siguientes relaciones:

$$\kappa = \frac{n_+ - n_-}{2} \quad (3.15)$$

$$n = \frac{n_+ + n_-}{2} \quad (3.16)$$

$$\mu = nZ \quad (3.17)$$

$$\varepsilon = \frac{n}{Z} \quad (3.18)$$

Capítulo 4. Resultados

4.1 Estructuras analizadas

Este apartado muestra el estudio paramétrico de dos estructuras, una de ellas se denomina “Cruces” [5] y la otra “Eles” [6]. En ambos casos, la estructura se imprime sobre placas de circuito impreso tipo FR4 con grosor de la metalización de $36\ \mu\text{m}$ y ancho del sustrato de $1.6\ \text{mm}$. La constante dieléctrica relativa es de $\varepsilon = 4.5 + j \cdot 0.15$.

El principal objetivo de este estudio es evaluar la influencia de los parámetros geométricos de las estructuras sobre la respuesta electromagnética de la misma para facilitar el diseño de dispositivos o aplicaciones basados en estos MTMQ.

La caracterización de ambos diseños dependientes de la frecuencia se divide en dos partes. En primer lugar, se evalúan las propiedades del medio quiral: dispersión óptica rotatoria, θ , elipticidad, η , y dicroísmo circular, Δ . En el caso concreto de la rotación del plano de polarización, además de evaluar θ en función de la frecuencia, se centra la atención en el valor de rotación pura, el cual se obtiene cuando la elipticidad es cero. Para esta frecuencia con rotación pura, la polarización de la onda incidente no se ve modificada al atravesar la estructura, solo será rotada.

En segundo lugar se caracterizan electromagnéticamente las estructuras mediante la obtención del índice de refracción, el parámetro de quiralidad, la permitividad y la permeabilidad. La observación de las frecuencias de resonancia, de las ondas polarizadas a derecha y a izquierda, son puntos de gran interés dado que determinan la banda de trabajo de nuestro dispositivo. En torno a esas frecuencias se localizan las zonas que presentan un índice de refracción negativo.

4.1.1 Estructura Cruces

La primera de las estructuras analizadas es la estructura llamada “Cruces” (cross-wires) [1] [5]. Este diseño, Fig. 11, presenta una celda unidad formada por dos cruces concéntricas impresas en ambos lados del PCI. Cada una de las caras por separado no

presenta quiralidad; esta propiedad se adquiere al girar la cruz de una de las caras con respecto de la otra, manteniendo fijo un eje normal a la superficie del aspa, situado en el centro de la figura.

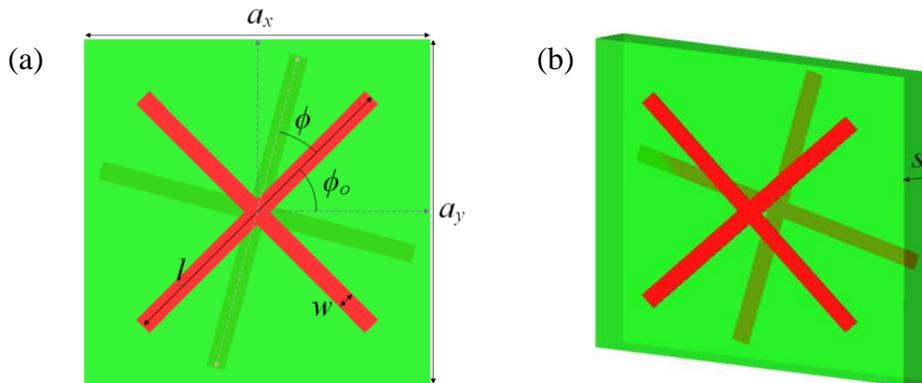
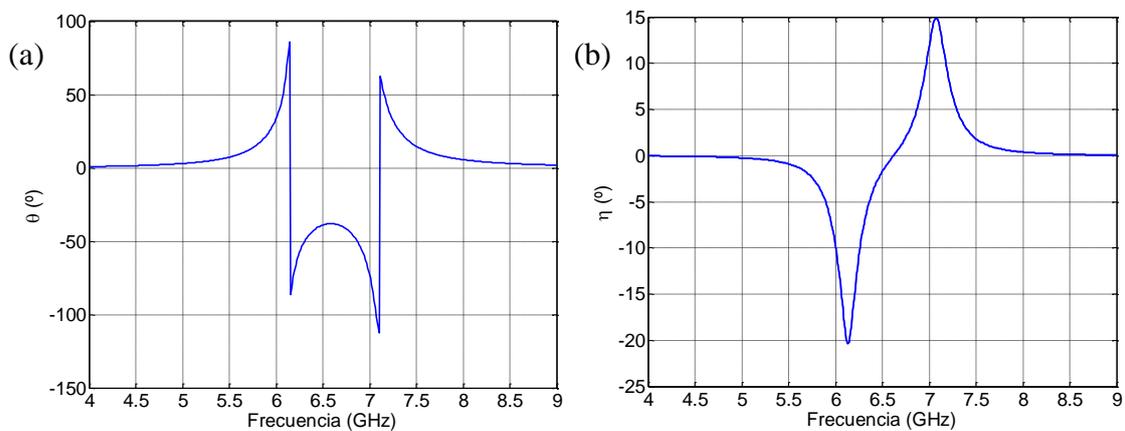


Figura 11: Esquema de la celda unidad estructura “Cruces”. (a) Vista frontal (b) Vista en perspectiva.

Como estructura de referencia se utilizan, cruces de longitud $l = 14$ mm, grosor $w = 0.8$ mm y espesor del cobre de $t_m = 36$ μm . La celda unidad es cuadrada con una altura y anchura $a_x = a_y = 15$ mm, y presenta una separación entre metalizaciones $s = 1.6$ mm. El giro mutuo entre cruces es de $\phi = 30^\circ$ y el conjunto de cruces se rota con respecto al eje y un ángulo $\phi_0 = 45^\circ$, ϕ_0 se denomina giro absoluto.

Aplicando el algoritmo de recuperación de parámetros, se obtienen los resultados relativos a la actividad óptica dependientes de la frecuencia: rotación del plano de polarización, θ , elipticidad, η , y dicroísmo circular, Δ (Fig. 12). Inspeccionando esta figura vemos que la estructura “Cruces” presenta dos resonancias una situada en 6.16 GHz y otra en 7.12 GHz (Fig. 12a). Asimismo, se observa cómo en este caso, se tiene una rotación pura del plano de polarización de $\theta = -38.6^\circ$ lo que implica un giro de $-1100^\circ/\lambda$. El dicroísmo circular (Fig. 12c) muestra que el medio presenta una mayor absorción de la componente circular a derechas entorno a la primera de las frecuencias de resonancias.



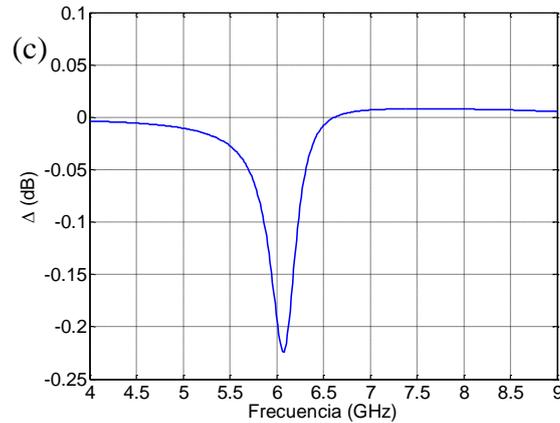
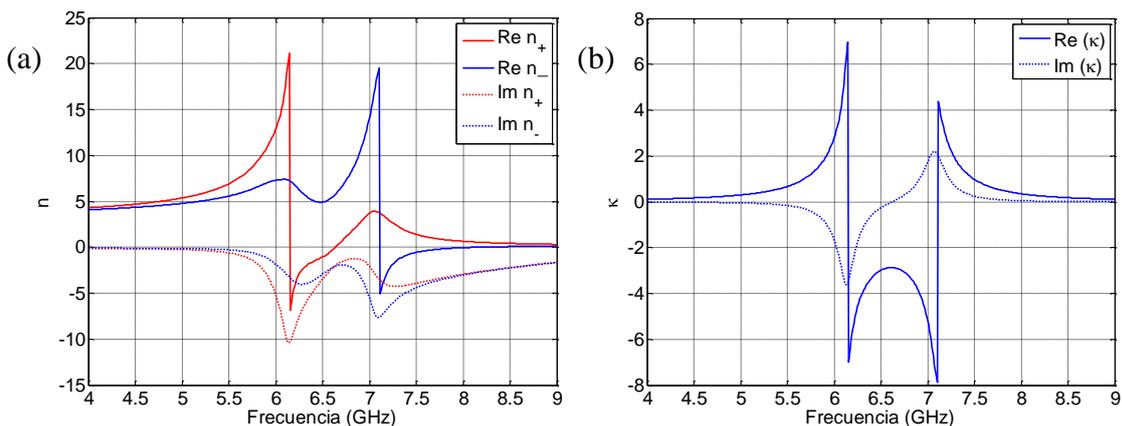


Figura 12: Dependencia con la frecuencia respecto a la actividad óptica, (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad y (c) dicroísmo circular.

Por otro lado, en el caso de la caracterización electromagnética, Fig. 13, se muestra la variación con la frecuencia de los parámetros característicos: el índice de refracción para las componentes CPD (n_+) y CPI (n_-), la quiralidad, la permitividad y la permeabilidad. Cada índice de refracción presenta una frecuencia de resonancia y valores negativos en las regiones frecuenciales inmediatamente posteriores. Las Fig. 13c y 13d, presentan los resultados relativos a la permitividad y la permeabilidad, respectivamente, poniendo de manifiesto que ϵ se corresponde con la segunda frecuencia de resonancia y μ con la primera. Los altos valores de ϵ y μ antes de la frecuencia de resonancia impiden obtener índice de refracción negativos en dichas zonas.

Para un análisis, más detallado, de las resonancias presentes en la estructura se realiza un estudio de la distribución de corriente superficial. En la Fig. 14 (ver página siguiente) se observa que para la resonancia de 6.16 GHz, la distribución de corriente entre las dos cruces se comporta de manera antiparalela, formando un lazo de corriente, formando un dipolo magnético. En cambio, en el caso de 7.15 GHz la distribución de corriente entre ambas cruces tiene un comportamiento paralelo, creando así un dipolo eléctrico.



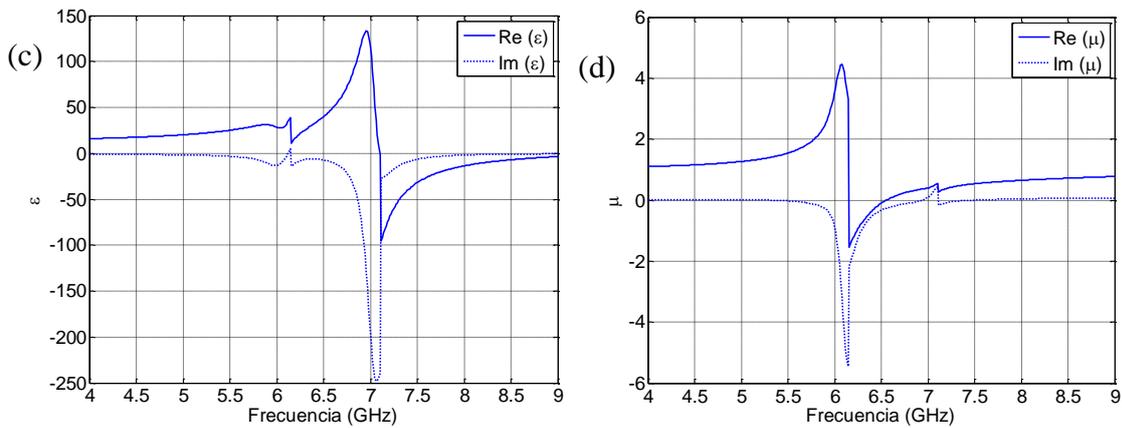


Figura 13: Variación con respecto a la frecuencia de la caracterización electromagnética, (a) índice de refracción de la onda electromagnética para la componente CPD (n_+) y para CPI (n_-), (b) parámetro de quiralidad, (c) parámetro permitividad y (d) parámetro permeabilidad.

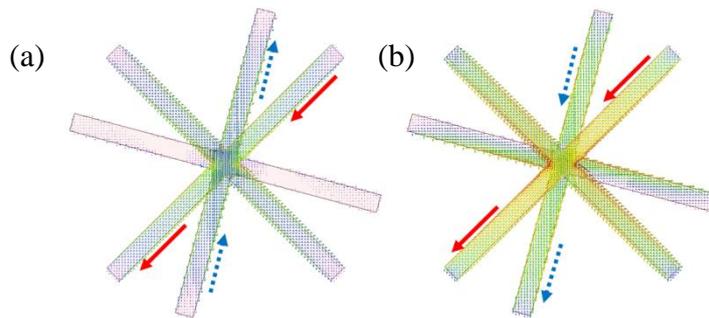


Figura 14: Distribución de la densidad de corriente superficial, (a) onda electromagnética CPD en 6.157 GHz, (b) onda CPI en 7.115 GHz. Las flechas indican la dirección de la corriente para ambas cruces.

Para evaluar la influencia de cada parámetro geométrico de la celda unidad de la Fig. 11, se varía uno de ellos y se mantiene el resto fijo (estudio paramétrico), observando la alteración de los parámetros característicos de la estructura (rotación, elipticidad, quiralidad...) dependientes de la frecuencia. Para la estructura “Cruces” se considera la influencia de los siguientes parámetros: giro relativo (ϕ), anchura de la cruz (w), giro absoluto (ϕ_0), anchura del dieléctrico (a_r) y espesor del dieléctrico (s).

Giro relativo

En primer lugar se evalúa la influencia del giro mutuo o relativo (ϕ) entre cruces sobre la respuesta de la estructura. Para ello, se obtiene la caracterización de estructuras con ángulos ϕ comprendidos entre -45° y 45° , con un paso de 15° .

A la vista de la Fig. 15, cabe destacar que la estructura es quiral si $\phi \neq n \cdot \pi / 4$, siendo n cualquier número entero. Este hecho se puede comprobar en el caso $\phi = 0$, situación la que la estructura no presenta actividad óptica. Analizando los valores de rotación “pura” (aquella obtenida para $\eta = 0$), se observa que el mayor valor absoluto es $|\theta| = 38.6^\circ$ que se corresponde con un giro mutuo de $\phi = \pm 30^\circ$.

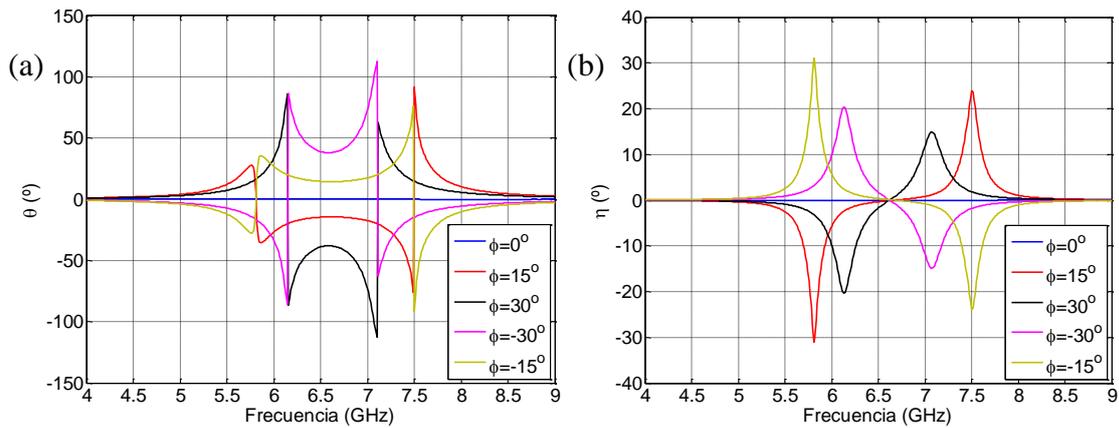


Figura 15: Influencia del giro relativo en la variación de la actividad óptica con la frecuencia (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad.

Por otra parte, la Fig. 16 muestra, la caracterización electromagnética de la estructura. De ella se deduce que al aumentar el giro relativo entre cruces, las resonancias se juntan en frecuencia, reduciéndose, por tanto, el ancho de banda con giro puro constante. Este aumento de ϕ también produce regiones frecuenciales con $n_{\pm} < 0$ más amplias y además, dado que el valor de κ es mayor, los índices de refracción negativos son más bajos.

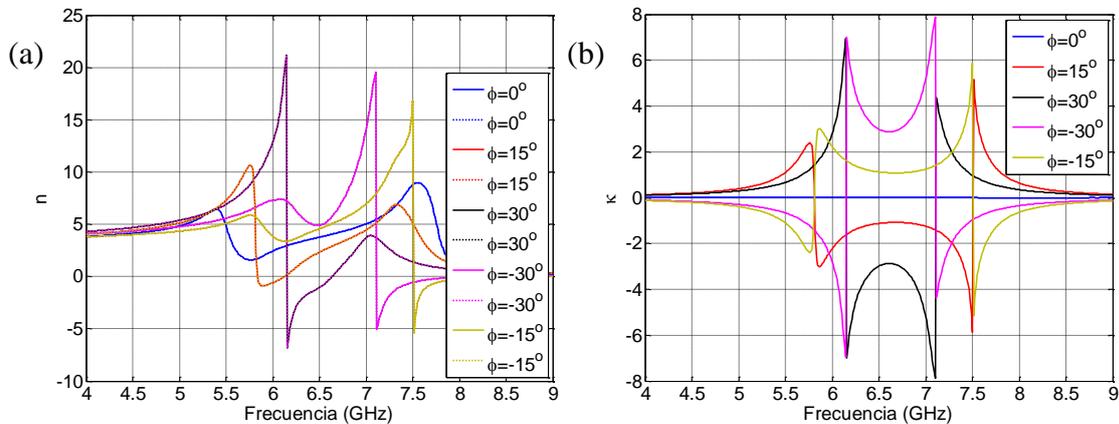


Figura 16: Influencia del giro relativo en la variación de la caracterización electromagnética con la frecuencia (a) índice de refracción de la onda electromagnética n_+ (—) y para n_- (---), (b) parámetro quiralidad.

Un aspecto a tener en cuenta, es que el sentido de giro mutuo condiciona el signo del parámetro quiralidad. Una estructura a derechas presenta la misma respuesta que una a izquierdas (con el mismo ϕ) pero con rotación, elipticidad y quiralidad de diferente signo y los índices de refracción n_+ y n_- intercambiados.

Anchura de la cruz.

El segundo apartado examina la influencia de la anchura de la cruz (w) sobre la actividad óptica y su caracterización electromagnética. Con ese fin, se realiza un barrido de w entre 0.4 mm y 1.2 mm con un paso de 0.2 mm.

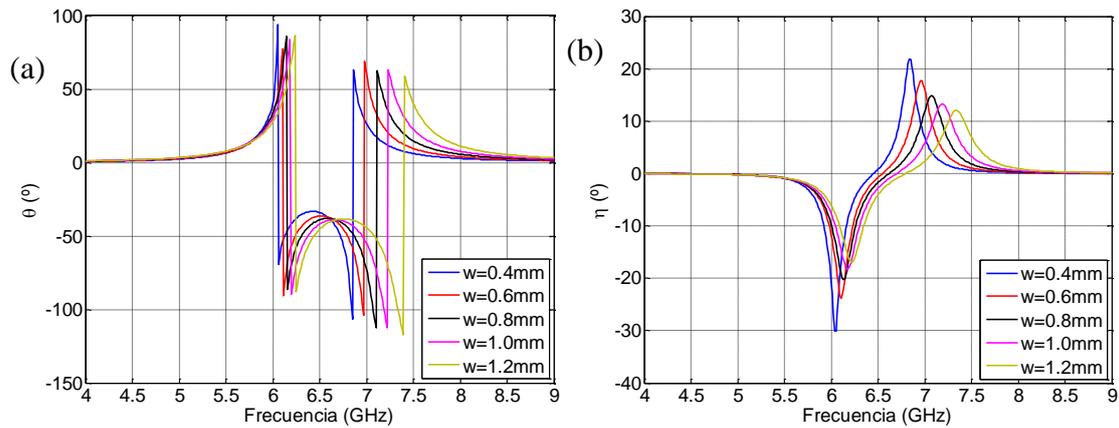
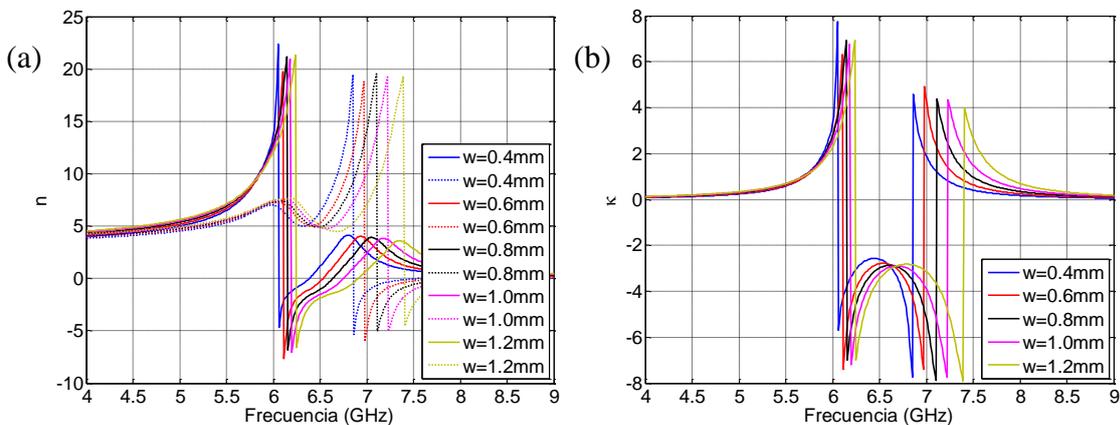


Figura 17: Influencia del ancho de la cruz en la variación de la actividad óptica con la frecuencia (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad.

En cuanto a la actividad óptica, Fig. 17, cabe comentar que el aumento en el grosor de la cruz mantiene de forma aproximada la primera resonancia constante, mientras que desplaza la segunda resonancia hacia frecuencias superiores, aunque manteniendo prácticamente constantes los valores de rotación pura. En el caso de la elipticidad en la Fig. 17b se puede ver que el aumento de w reduce el valor de η en las frecuencias de resonancias.

Desde el punto de vista del índice de refracción (Fig. 18a), al aumentar la separación de las resonancias (al incrementar w) se produce un aumento en el ancho de banda en el que uno de los índices de refracción, en este caso n_+ , es negativo.

Cabe mencionar que, debido a que la influencia de w sólo actúa sobre la segunda de las resonancias, la permitividad se va a ver desplazar hacia frecuencias mayores al aumentar el grosor de la metalización, mientras que la permeabilidad permanece prácticamente constante.



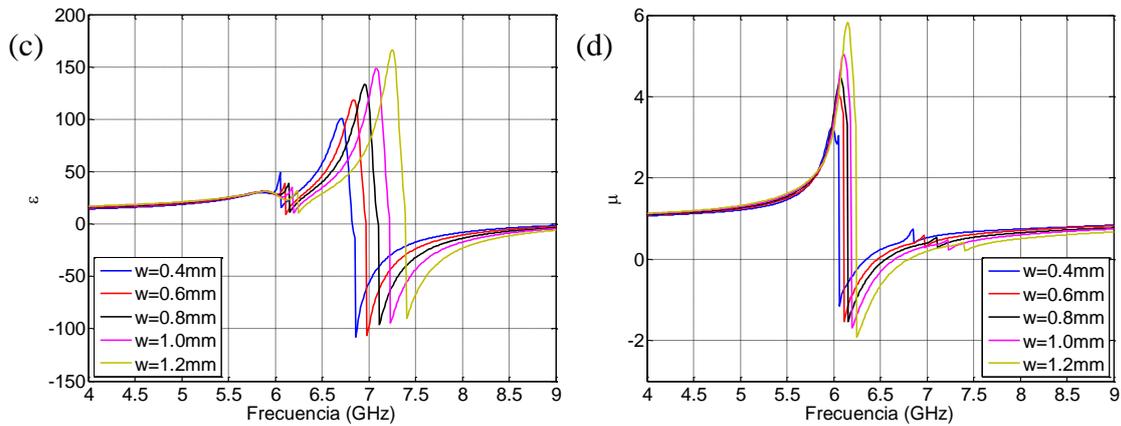


Figura 18: Influencia del giro relativo en la variación de la caracterización electromagnética con la frecuencia (a) índice de refracción de la onda electromagnética para la componente n_+ (—) y para n_- (---), (b) parámetro quiralidad, (c) parámetro permitividad y (d) parámetro permeabilidad.

Giro absoluto

El giro absoluto (ϕ_0) indica la posición de las dos cruces dentro de la celda unidad. Su variación no modifica la geometría de la estructura aunque sí la situación de la misma con relación a las celdas vecinas.

El parámetro ϕ_0 puede variar entre $[0, \pi/2] + m \cdot \pi/2$, siendo m un número entero. La Fig. 19 muestra la rotación del plano de polarización de la estructura con un giro absoluto entre 0° y 75° y paso de 15° . En estas gráficas se observa cómo la variación de ϕ_0 tiene una gran influencia sobre la actividad óptica.

En relación a la rotación del plano de polarización, en la Fig. 19a se observa cómo tanto la magnitud como el signo de θ dependen notablemente de ϕ_0 . La Fig. 19b representa los valores puros de θ en función del giro absoluto con ϕ_0 de 0° a 85° con paso de 5° . En esta figura se observa una primera zona, entre 5° y 55° , donde la estructura produce rotación negativa, y una segunda zona, entre 60° y 90° (0°), donde se tiene un giro positivo. En la primera zona se consigue un giro máximo de $\theta = -45.76^\circ$ con $\phi_0 = 30^\circ$ y en la segunda se consigue un giro muy alto $\theta = 109.7^\circ$ con $\phi_0 = 75^\circ$.

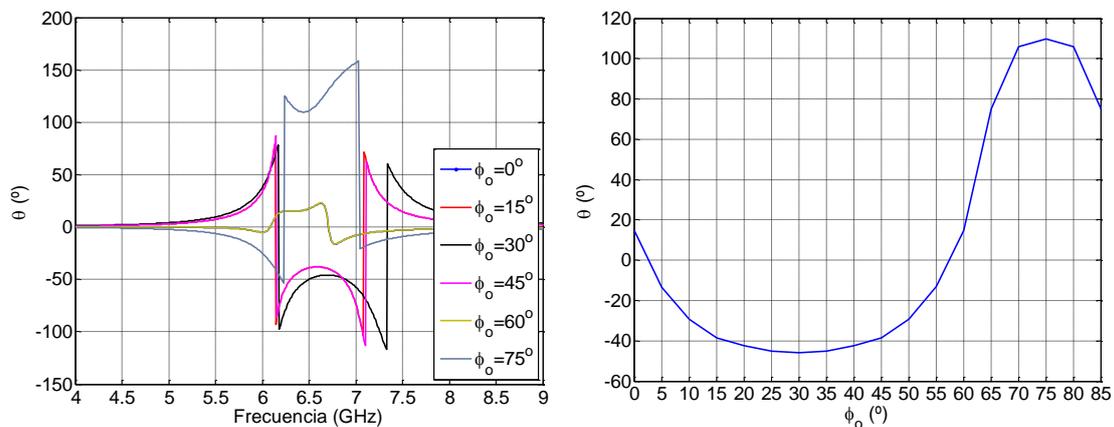


Figura 19: Influencia del giro absoluto en (a) la variación del plano de polarización con la frecuencia y (b) en la rotación pura.

Anchura del dieléctrico.

En este apartado se evalúa la anchura del dieléctrico, a_x , parámetro que refleja la separación entre metalizaciones de celdas vecinas. Se analizan 7 separaciones diferentes, que oscilan entre $a_x = 14$ mm (tamaño mínimo de la celda unidad) y $a_x = 20$ mm.

La influencia de a_x sobre la actividad óptica se muestra en la Fig. 20, donde se puede ver cómo el aumento del tamaño de la celda unidad proporciona valores menores de rotación pura, con valores comprendidos entre $\theta = -25.91^\circ$ (mínimo) para $a_x = 20$ mm y $\theta = -44.62^\circ$ (máximo) para $a_x = 14$ mm. Asimismo, el aumento de la anchura produce un desplazamiento de la segunda resonancia hacia frecuencias inferiores y valores de elipticidad mayores (Figura 18b). Por tanto, al separar las metalizaciones de celdas contiguas (aumento de a_x) se reduce el acoplo entre las mismas, lo cual produce una menor rotación del plano de polarización y una mayor elipticidad.

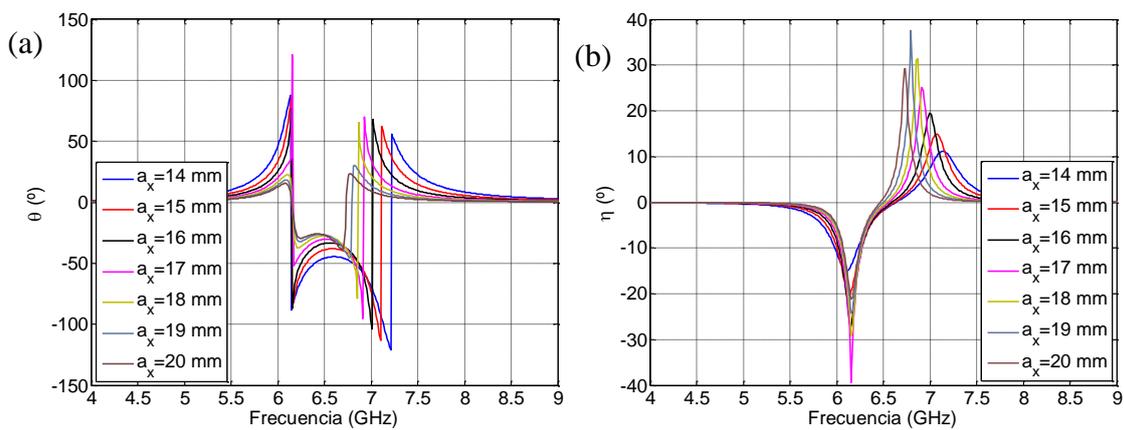


Figura 20: Influencia del ancho del dieléctrico en la variación de la actividad óptica con la frecuencia (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad.

Por otra parte, la caracterización de la estructura desde el punto de vista electromagnético, Fig. 21, muestra que a medida que a_x disminuye, el ancho de banda con índice de refracción $n_+ < 0$ aumenta y presenta valores absolutos cada vez más mayores. También cabe señalar, que al igual que sucedía cuando se varía w , sólo la permitividad se va a ver afectada. Esto es debido a que las modificaciones que se producen en la estructura solo influyen en la segunda de las frecuencias de resonancia, manteniendo la primera prácticamente constante.

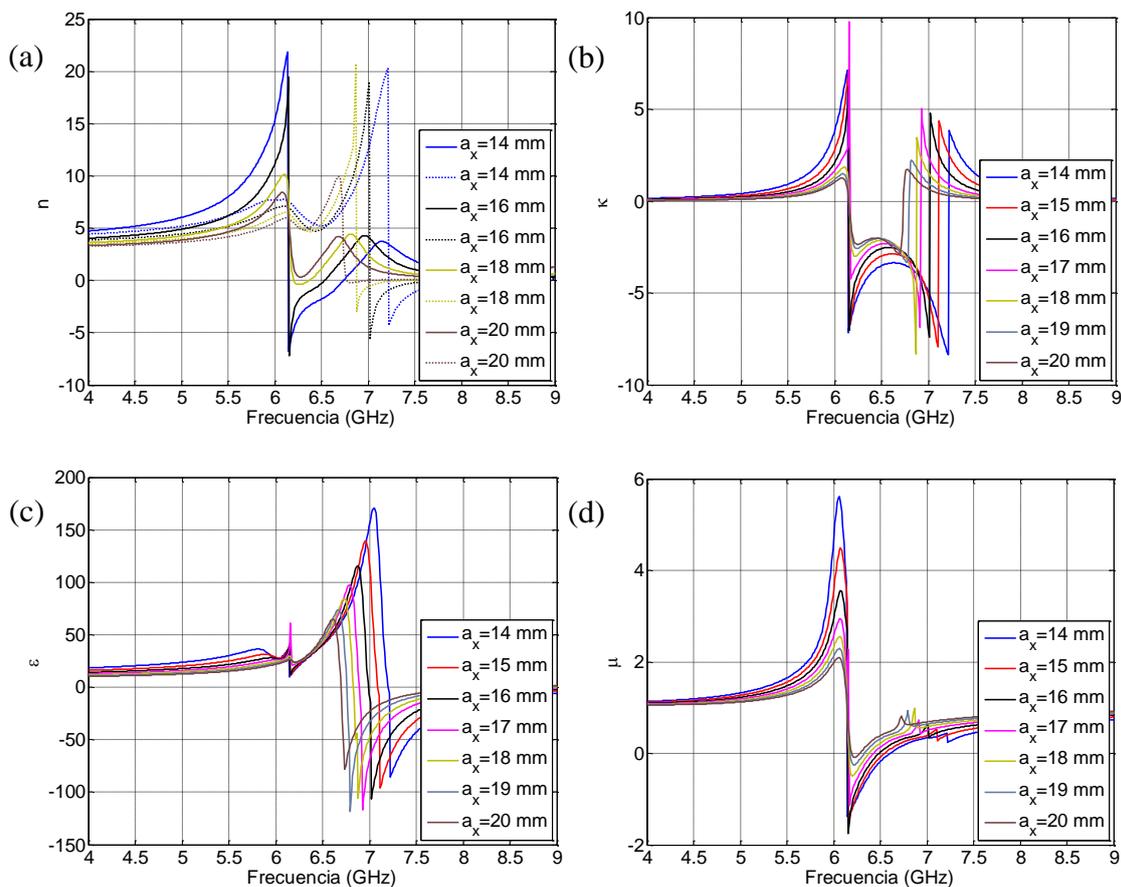


Figura 21: Influencia del giro relativo en la variación de la caracterización electromagnética con la frecuencia (a) índice de refracción de la onda electromagnética para la componente n_+ (—) y para n_- (---), (b) parámetro quiralidad, (c) parámetro permitividad y (d) parámetro permeabilidad.

Espesor del dieléctrico.

La última caracterización llevada a cabo sobre esta estructura, es la influencia del espesor del dieléctrico (s). Para ello, se varía dicho parámetro entre un valor mínimo de $s = 1.0$ mm y máximo de $s = 2.2$ mm, con un paso de 0.3 mm.

Por una parte, en la Fig. 22, se representan los resultados registrados para la actividad óptica. La Fig. 22a, muestra los valores de la rotación pura, donde es significativo resaltar que el mayor valor conseguido, se da en el caso de un menor espesor del dieléctrico. El resultado obtenido para este caso, $s = 1.0$ mm es de $\theta = -43.54^\circ$.

Por otra parte, la caracterización electromagnética, Fig. 23, también se ve influenciada por la modificación del espesor del dieléctrico. A la vista de esta figura, cabe señalar, que un cambio en el espesor del dielectrico afecta en valor absoluto al índice de refracción. Así, a medida que el dieléctrico es más delgado (s disminuye) se aprecian unos valores de $n_{\pm} < 0$ mayores en valor absoluto.

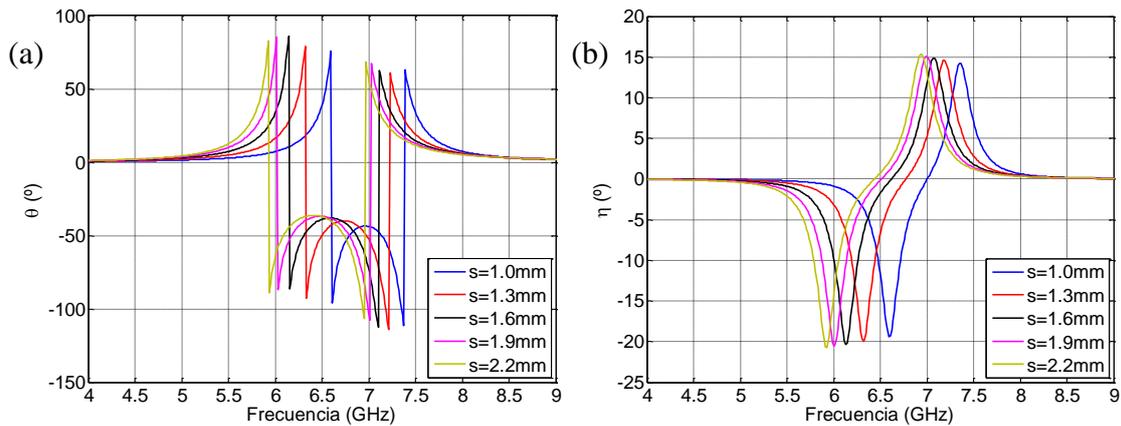


Figura 22: Influencia del espesor del dieléctrico en la variación de la actividad óptica con la frecuencia (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad.

Finalmente, en el caso de la quiralidad, Fig. 23b, se detecta cómo espesores del dieléctrico más pequeños afectan de manera más notable al parámetro quiralidad, consiguiendo un valor máximo de -5.

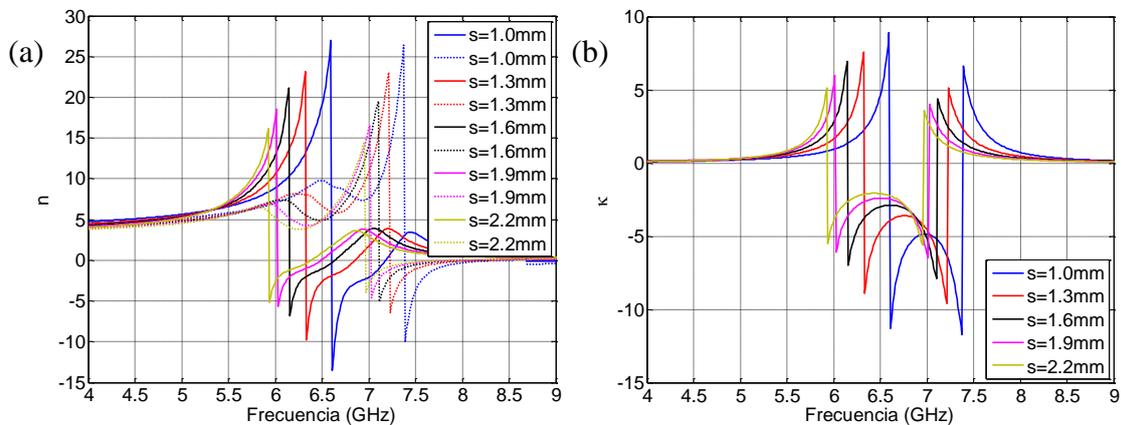


Figura 23: Influencia del espesor del dieléctrico en la variación de la caracterización electromagnética con la frecuencia (a) índice de refracción de la onda electromagnética para la componente n_+ (—) y para n_- (---), (b) parámetro quiralidad.

4.1.2 Estructura Eles

La segunda de las estructuras analizadas es la denominada “Eles” [6]. Este diseño, Fig. 24, presenta una celda unidad cuyas caras están compuestas por cuatro metalizaciones en forma de “Ele”. Cada una de ellas está girada un ángulo de 90° con respecto al cuadrante anterior, formando una disposición similar a una cruz gamada. El diseño de una de las caras es la imagen especular (enantiomero) de la otra.

La celda unidad de referencia se compone de metalizaciones con longitud $l = 6$ mm, grosor $w = 1.5$ mm y espesor del cobre de $t_m = 36$ μm . El dieléctrico será cuadrado con una altura y anchura $a_x = a_y = 15$ mm, y un espesor $s = 1.6$ mm. La separación entre las cuatro eles de la misma cara será $d = 1$ mm.

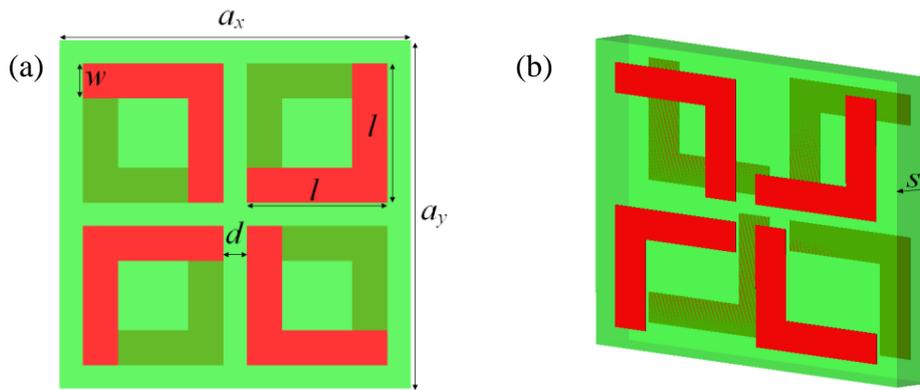


Figura 24: Esquema de la celda unidad estructura “Eles”. (a) Vista frontal (b) Vista en perspectiva.

En primer lugar, se exponen los resultados relativos a la dependencia de la actividad óptica con la frecuencia: rotación del plano de polarización, elipticidad y dicroísmo circular (Fig. 25). En esta figura cabe comentar que el diseño “Eles” presenta dos frecuencias de resonancia, una localizada en 12.55 GHz y la otra en 14.35 GHz, situando la estructura en una banda de trabajo más alta que en el caso de las “Cruces”. Asimismo, se observa cómo esta estructura presenta una rotación pura del plano de polarización de $\theta = 36.58^\circ$, lo que se traduce en un giro de $505.26^\circ/\lambda$. En el caso de la elipticidad y el dicroísmo circular, presenta valores bajos, inferiores a $\eta = 1.5^\circ$, y de $\Delta = 0.03$.

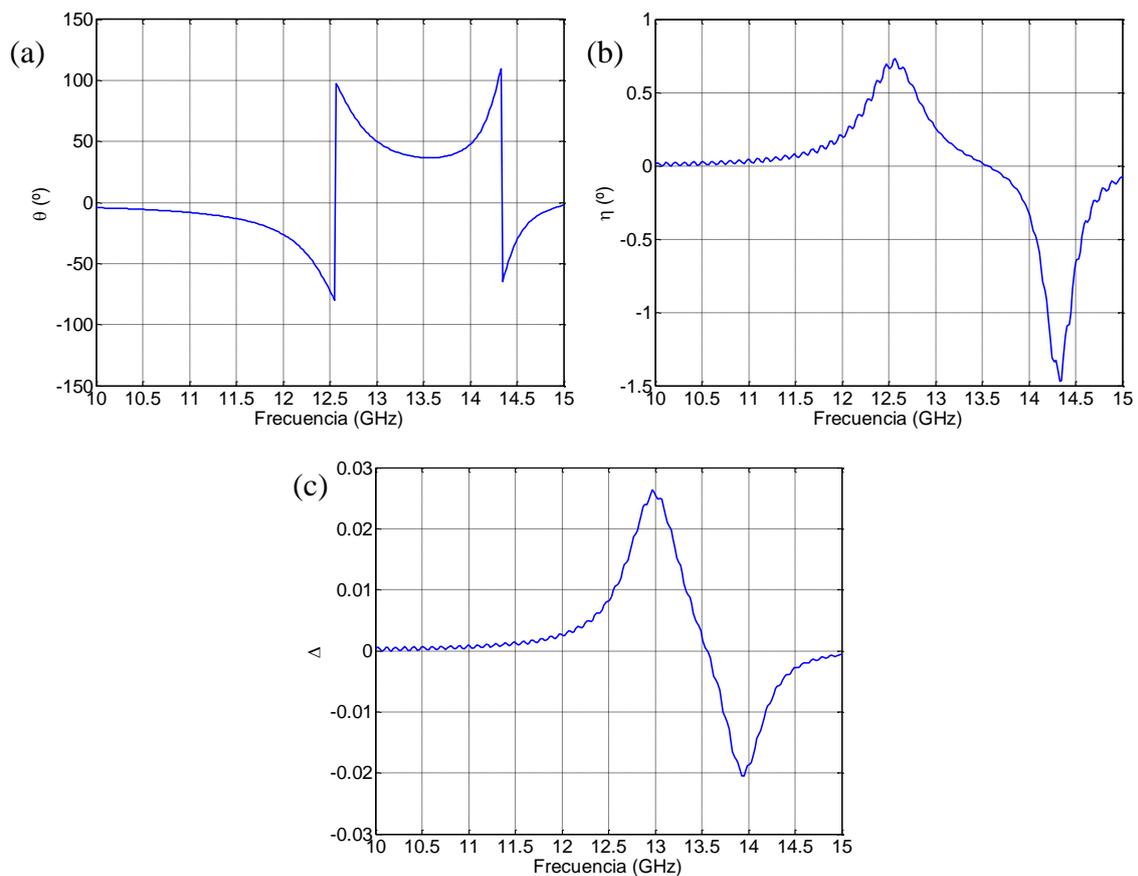


Figura 25: Dependencia con la frecuencia de la actividad óptica, (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad y (c) dicroísmo circular.

Por otro lado, la caracterización electromagnética en función de la frecuencia, se expone mediante la Fig. 26 (ver página siguiente). Como en casos anteriores, los índices de refracción de las componentes CPD (n_+) y CPI (n_-) presentan valores negativos en las regiones frecuenciales inmediatamente posteriores a su correspondiente frecuencia de resonancia.

Al igual que en el caso de las “Cruces”, se estudia la distribución de corriente superficial presente en la estructura. Este diseño posee dos frecuencias de resonancia, una localizada en 12.55 GHz asociada a las corrientes paralelas y otra situada en 14.35 GHz relativa a las corrientes antiparalelas (ver Fig. 27 página siguiente). Por lo tanto, ambos diseños presentan dos frecuencias de resonancia, una eléctrica y otra magnética, aunque intercambiadas en frecuencia en una estructura con respecto a la otra. Este comportamiento produce que la estructura “Cruces” produzca un giro negativo (a izquierdas), mientras que la estructura “Eles” produce un giro positivo (a derechas).

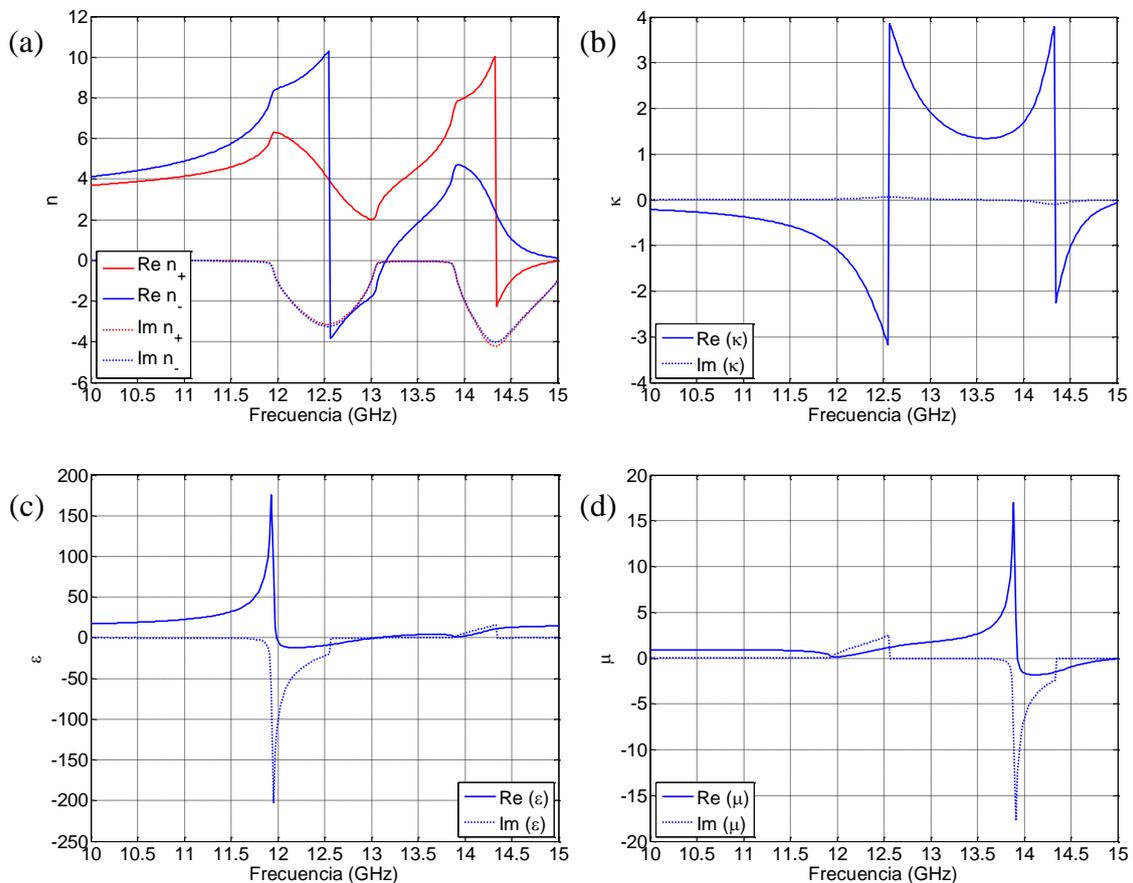


Figura 26: Variación con respecto a la frecuencia de la caracterización electromagnética, (a) índice de refracción de la onda electromagnética para la componente CPD (n_+) y para CPI (n_-), (b) parámetro de quiralidad, (c) parámetro permitividad y (d) parámetro permeabilidad.

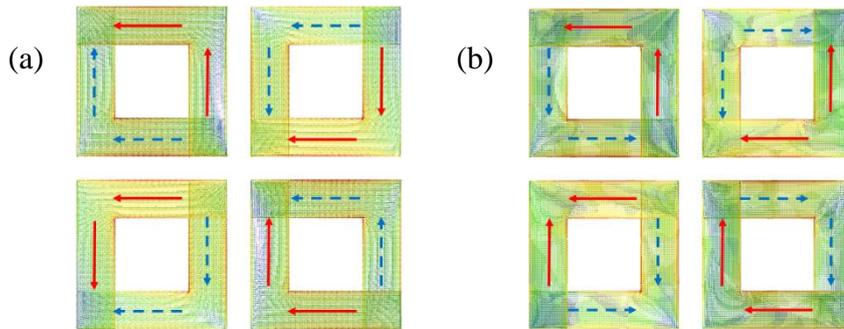


Figura 27: Distribución de la densidad de corriente superficial, (a) onda electromagnética CPD en 12.55 GHz, (b) onda CPI en 14.35 GHz. Las flechas indican la dirección de la corriente para ambas cruces.

De forma equivalente, se realiza un estudio paramétrico sobre la dependencia de la frecuencia con la actividad óptica y los parámetros relativos a la caracterización electromagnética. Para esta estructura se ha estudiado la influencia de dos grupos de parámetros. El primero engloba los parámetros relativos a las dimensiones de las metalizaciones (longitud, l y anchura, w) y el segundo refleja la interacción entre metalizaciones contiguas, ya sean de la misma cara de la celda unidad (separación entre eles, d), entre caras de la celda unidad, (grosor del dieléctrico, s), o entre celdas vecinas, (ancho de la celda unidad, a_x).

Longitud de eles

En primer lugar se evalúa la influencia de la longitud de los segmentos (l) que conforman cada una de las metalizaciones con forma “Ele”. Para ello, se analizan longitudes entre $l = 5$ mm y $l = 6.5$ mm con paso de 0.5 mm.

Atendiendo a la Fig. 28, se observa como la variación de l produce una variación de la longitud eléctrica de las estructuras y, por tanto, un desplazamiento de las frecuencias de resonancia. De forma aproximada, se puede establecer que, cada variación de $l = 0.5$ mm produce una variación en frecuencia de 1 GHz.

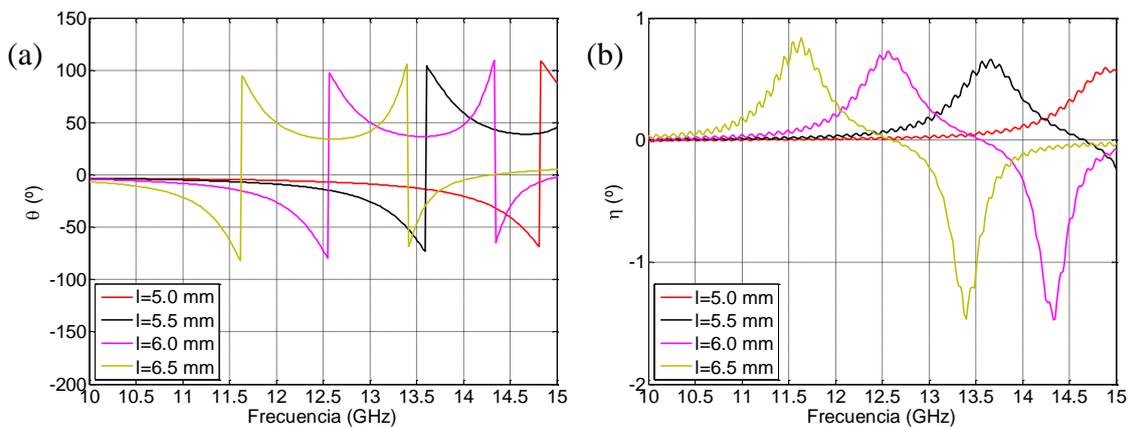


Figura 28: Influencia de la longitud de las eles en la variación de la actividad óptica con la frecuencia (a) rotación del plano de polarización y (b) elipticidad.

La caracterización electromagnética solamente presenta un desplazamiento en frecuencia de la respuesta ya presentada en la figura 26.

Anchura Eles

En segundo lugar, se examina la influencia de la anchura (w) de las líneas impresas que conforman la estructura con forma “Ele”. Con este fin, se estudia anchuras w que oscilan entre $w = 0.5$ y $w = 3$ mm con paso de 0.5 mm.

Al variar tanto l , como w se produce una variación de la longitud eléctrica de la estructura ($long = 2 \cdot (l - w/2)$) y, por tanto, también genera un desplazamiento de las frecuencias de resonancia. Sin embargo, a diferencia del comportamiento observado con l , la variación de w produce una modificación del comportamiento mucho más marcada (Fig. 29 y 30).

A la vista de los resultados de Fig.29, cabe señalar que a medida que aumenta w la separación entre resonancias disminuye, propiciada principalmente por el desplazamiento de la primera de ellas, lo que repercute en un aumento significativo de la rotación del plano de polarización. De los $\theta = 7.86^\circ$ con $w = 0.5$ mm asciende hasta los $\theta = 81.01^\circ$ para 3 mm.

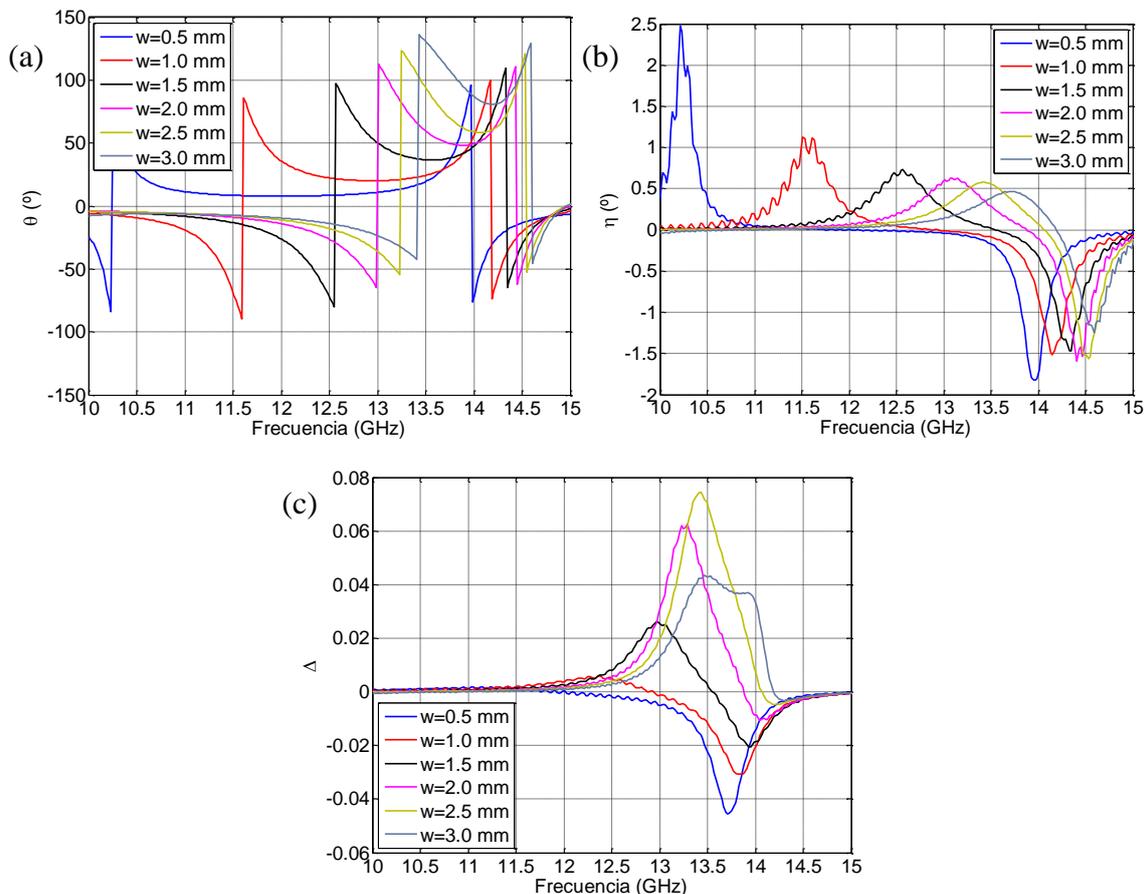


Figura 29: Influencia de la anchura de las eles en la variación de la actividad óptica con la frecuencia (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad y (c) dicroísmo circular.

Asimismo, la Fig. 29 exhibe que valores bajos de w permiten obtener anchos de banda mayores, con dicroísmo circular y elipticidad prácticamente nulos. En las Fig. 29b y 29c se puede ver que cuando w crece, el dicroísmo circular y la elipticidad cruzan el 0 con mayor pendiente. El mayor valor de dicroísmo circular se alcanza para $w = 2.5$ mm, superando $\Delta = 0.07$.

En relación a la caracterización electromagnética, (ver Fig. 30), un aspecto a destacar es que la resonancia eléctrica, se ve más influenciada por este parámetro geométrico que la magnética. Por este motivo, la permitividad presenta una mayor variación, tanto en valor absoluto como en frecuencia, que la permeabilidad, la cual se mantiene prácticamente constante en los casos estudiados.

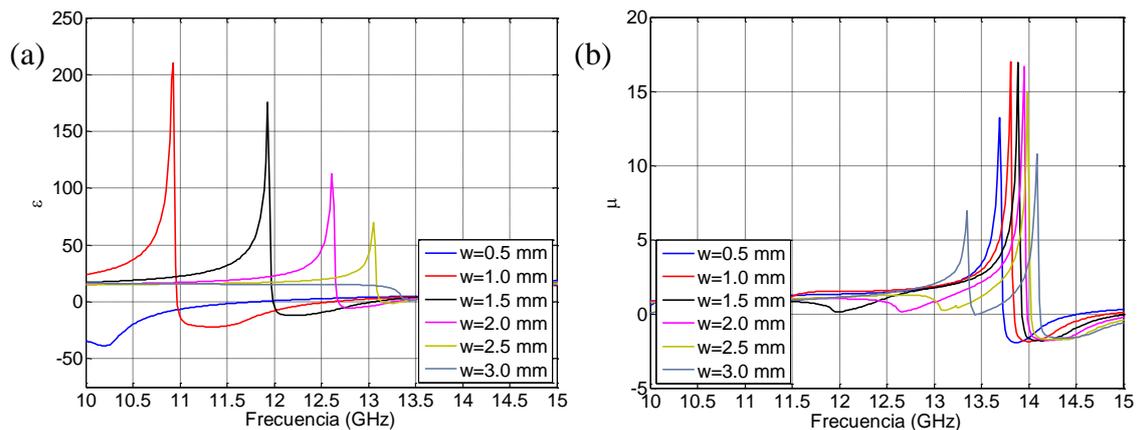


Figura 30: Influencia de la anchura de las eles en la variación de la caracterización electromagnética con la frecuencia, (a) parámetro permitividad y (b) parámetro permeabilidad.

Separación Eles

La distancia comprendida entre las metalizaciones con forma “Ele” (d) representa el primero de los parámetros que refleja separación entre metalizaciones. Con el objetivo de realizar su caracterización se analizan separaciones, que varían entre $d = 0.5$ y $d = 2$ mm con paso de 0.5 mm.

Desde el punto de vista de la actividad óptica, Fig. 31, se observa que un aumento de la separación entre eles, reduce los valores de rotación, pasando de casi $\theta = 50^\circ$ con $d = 0.5$ mm a prácticamente $\theta = 0^\circ$ con $d = 2$ mm. Esta variación también influye en la separación entre resonancias, así valores pequeños de d producen mayores anchos de banda con rotación prácticamente pura y constante.

En cuanto a la caracterización electromagnética, en la Fig. 32b se observa que una separación alta, $d = 2$ mm, no produce quiralidad por tanto el índice de refracción (Fig. 29a) es igual para las ondas CPD (n_+) y CPI (n_-). Sin embargo cuando las separaciones son bajas, los altos valores de quiralidad obtenidos aportan, entre los casos analizados, índices de refracción negativos, principalmente para la componente CPI, con mayores anchos de banda.

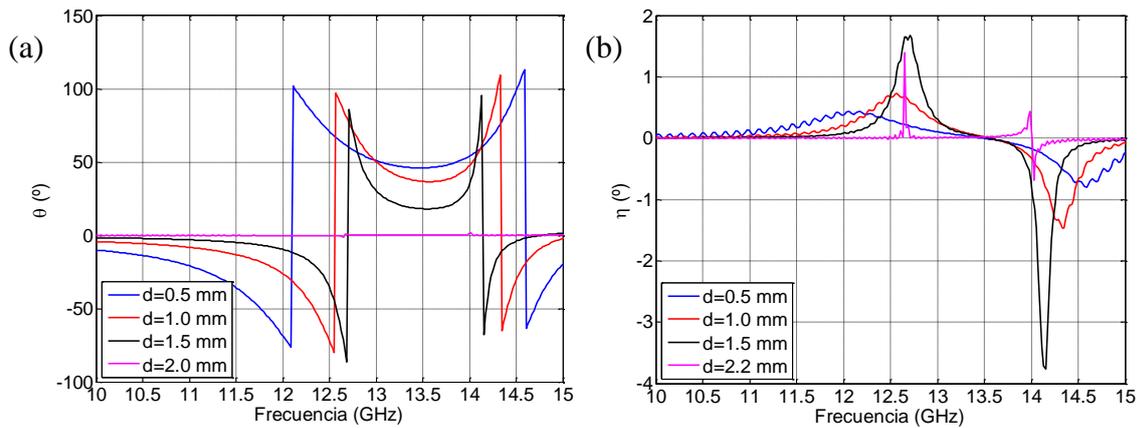


Figura 31: Influencia de la separación entre las eses en la variación de la actividad óptica con la frecuencia (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad.

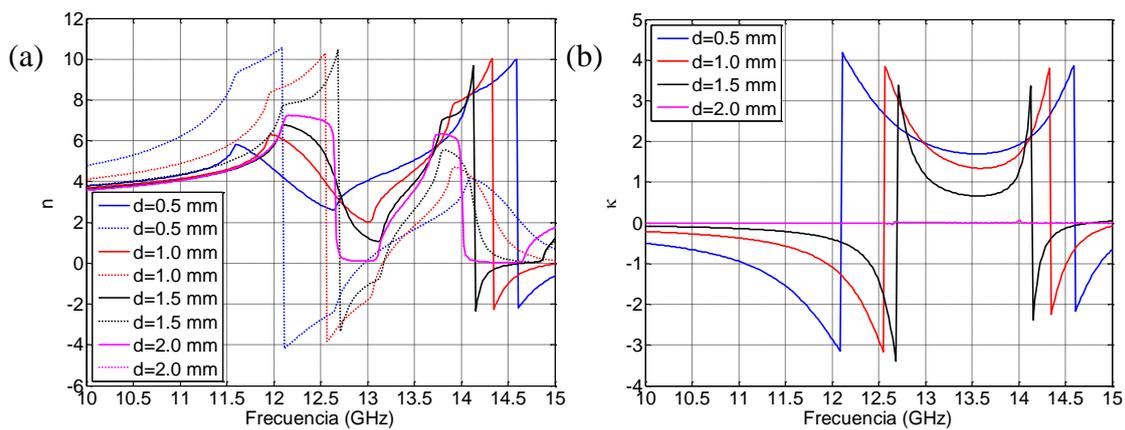


Figura 32: Influencia de la separación entre eses en la variación de la caracterización electromagnética con la frecuencia. (a) índice de refracción de la onda electromagnética para la componente n_+ (—) y para n_- (---), (b) parámetro quiralidad,.

Grosor del dieléctrico

El grosor del dieléctrico (s), es un parámetro geométrico que controla la separación entre las metalizaciones situadas a ambas caras de la celda unidad. En este caso, se estudian grosores de dieléctrico de 1, 1.3, 1.6, 1.9 y 2.2 mm.

De forma general, la variación de s influye notablemente sobre las frecuencias de resonancia (ver Fig. 33). A medida que aumenta la separación, las frecuencias de resonancia se mantienen equidistantes aunque se desplazan a valores de frecuencia menores.

En relación a la actividad óptica, al reducir la separación entre ambas caras del sustrato, se observa como la rotación pura presenta valores ligeramente más bajos, pasando de $\theta = 34.97^\circ$ para $s = 2.2$ mm a $\theta = 27.94^\circ$ para $s = 1$ mm.

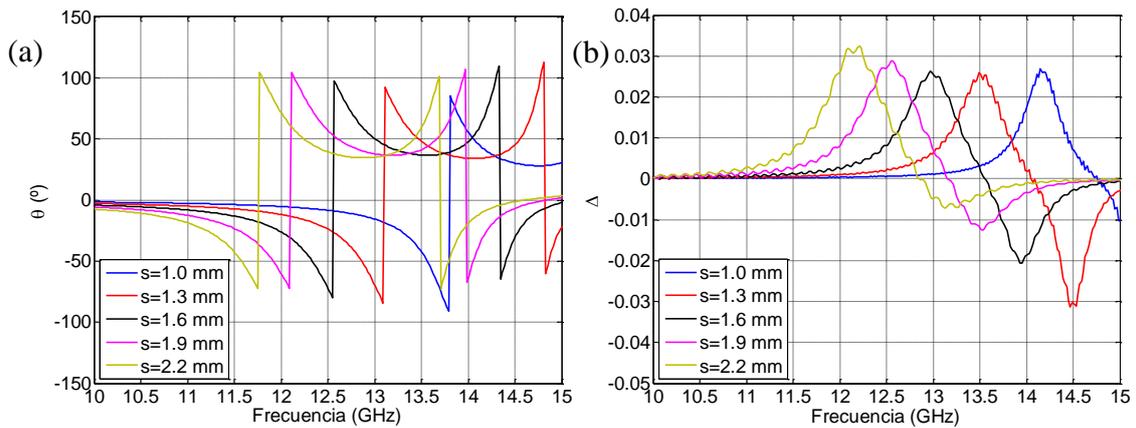


Figura 33: Influencia del espesor del dieléctrico en la la variación de la frecuencia con actividad óptica (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad.

Por otra parte, la caracterización electromagnética, confirma el desplazamiento de las frecuencias de resonancia hacia valores más bajos al aumentar el espesor del dieléctrico, viéndose más afectada la frecuencia relativa a la permitividad.

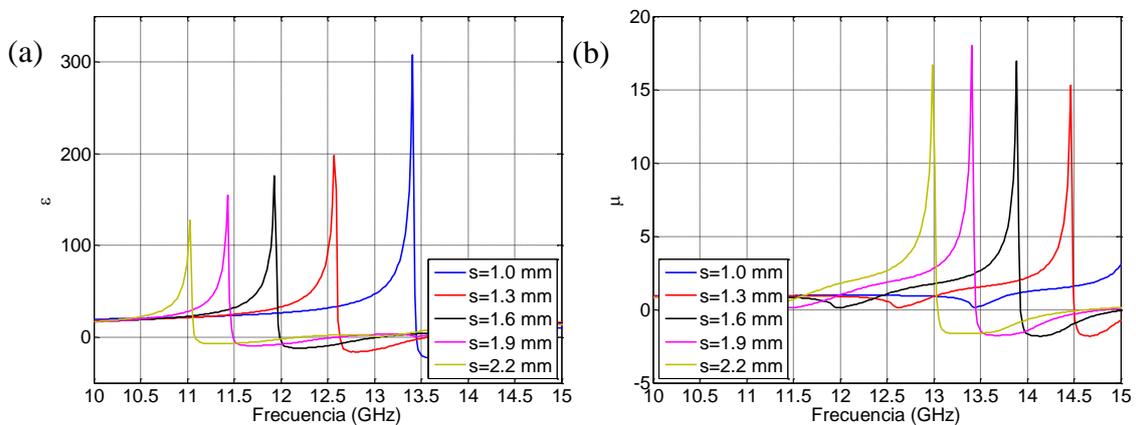


Figura 34: Influencia del espesor del dieléctrico en la variación de la frecuencia con la caracterización electromagnética, (a) parámetro permitividad y (b) parámetro permeabilidad.

Anchura dieléctrico

La última caracterización realizada sobre la estructura “Eles”, analiza la influencia de la anchura del dieléctrico (a_x) sobre los diferentes parámetros investigados. Con este fin, se examinan diferentes tamaños comprendidos entre $a_x = 15$ mm y $a_x = 20$ mm mostrados en la Fig. 35.

A la vista de la Fig. 35a, relativa a la influencia de la anchura del dieléctrico sobre la rotación del plano de polarización, se observa cómo un aumento del tamaño de la celda unidad proporciona un descenso en los valores de la rotación. Los valores obtenidos se encuentran entre los $\theta = 21.35^\circ$ para $a_x = 20$ mm y $\theta = 36.58^\circ$ para $a_x = 15$ mm.

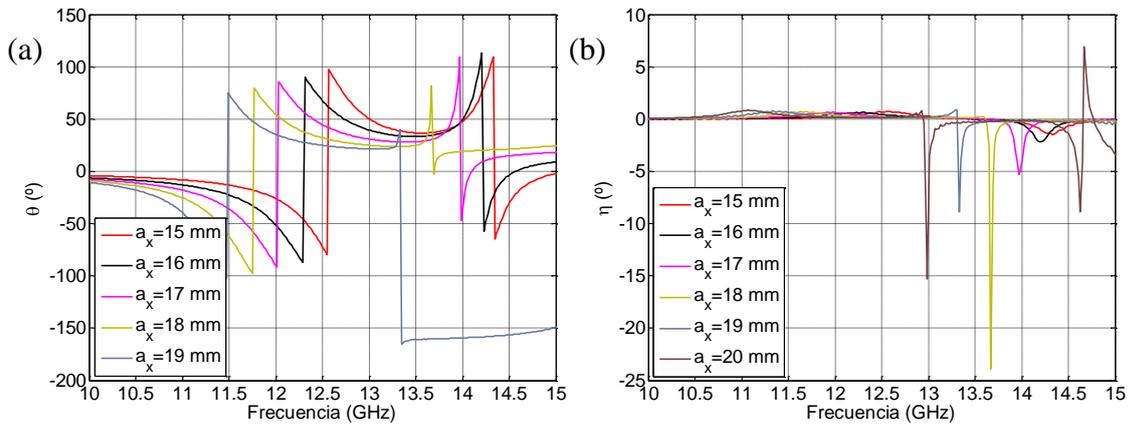


Figura 35: Influencia de la anchura del dieléctrico en la variación de la frecuencia con la actividad óptica (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad.

Cabe mencionar que en el caso de la caracterización electromagnética, Fig. 36, se detecta una mayor influencia en la primera de las resonancias, registrando los mayores anchos de banda en los que se tiene un índice de refracción negativo, así como los mayores valores absolutos de los mismos.

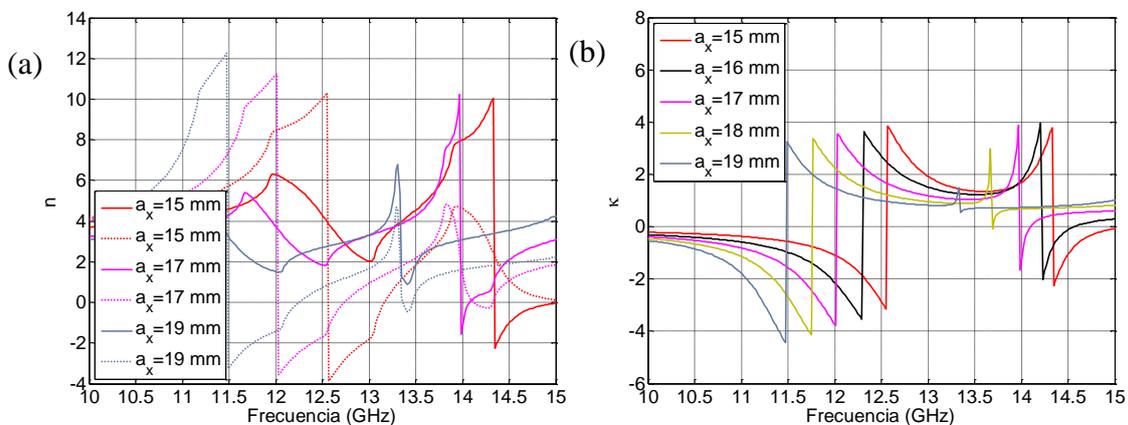


Figura 36: Influencia del giro relativo en la variación de la frecuencia con la caracterización electromagnética (a) índice de refracción de la onda electromagnética para la componente n_+ (—) y para n_- (---), (b) parámetro quiralidad.

4.2 Estructura propia

A partir de los diseños analizados previamente, con el objetivo de combinar las propiedades más destacadas de cada uno de ellos y mejorarlas, en este trabajo se ha creado una nueva estructura MTMQ (ver Fig. 37). La celda unidad en este caso, tiene como origen la estructura “Cruces” manteniendo los parámetros geométricos ya presentados como estructura de referencia, con la salvedad de que se le ha aplicado un giro absoluto y relativo de 0° . A la estructura “Cruces” se le añade la estructura “Eles” con las mismas dimensiones pero con su enantiomero.

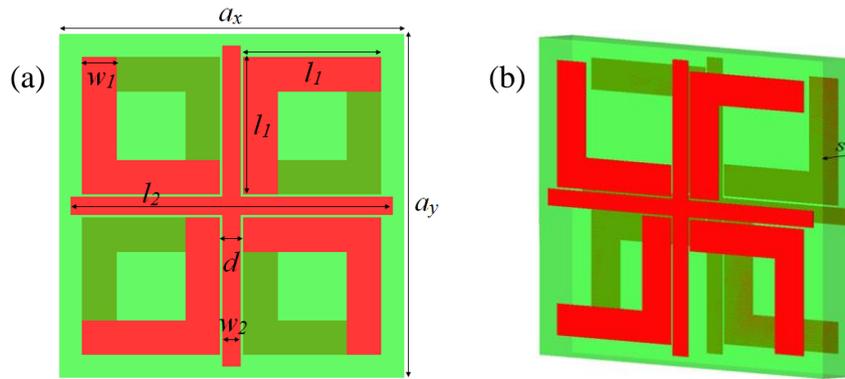
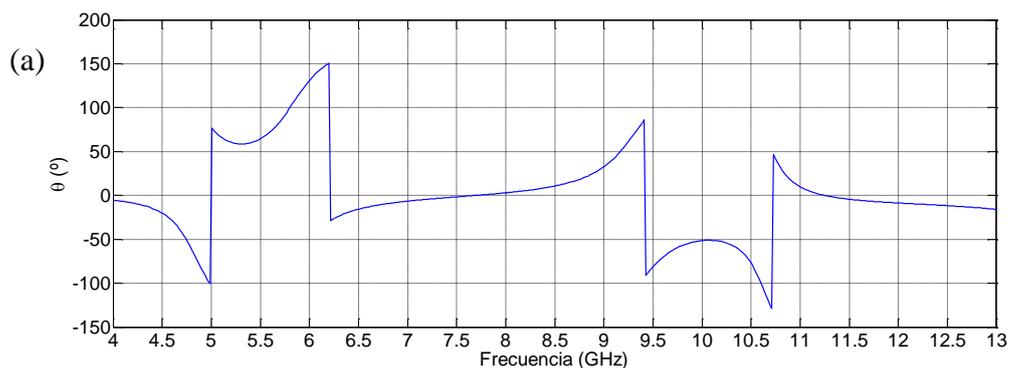


Figura 37: Esquema de la celda unidad estructura “Eles”. (a) Vista frontal (b) Vista en perspectiva.

El diseño analizado cuenta con los siguientes parámetros geométricos: en el caso de las “Eles”, se compone por metalizaciones de longitud $l_1 = 6$ mm, grosor de pista $w_1 = 1.0$ mm y separación entre estructuras en forma de “Ele” de una misma cara $d = 1$ mm. El diseño de la metalización que conforman las cruces, tiene longitud $l_2 = 14$ mm y grosor $w_2 = 0.8$ mm. En ambos casos se cuenta con un espesor del cobre de $t_m = 36$ μm . La celda unidad será cuadrada contando con una altura y anchura $a_x = a_y = 15$ mm, y separación entre metalizaciones $s = 1.6$ mm.

Como en casos anteriores, se realiza una caracterización de la estructura tanto de la actividad óptica como de los parámetros electromagnéticos característicos. En primer lugar, destaca en esta ocasión la presencia de 4 frecuencias de resonancia (Fig. 38), a diferencia de las dos que presentan tanto “Cruces” como “Eles”. Las frecuencias de resonancia del diseño se localizan en 5 GHz, 6.22 GHz, 9.43 GHz y 10.73 GHz, creando dos regiones de trabajo diferenciadas. Esta respuesta bi-banda representa la primera de las mejoras de esta nueva estructura.

A la vista de los resultados de la actividad óptica, Fig.38, la rotación del plano de polarización, θ , obtiene un valor puro de $\theta = 58.71^\circ$ en la primera banda y de $\theta = -51.15^\circ$ en la segunda, muy similares en ambos casos pero de signos opuestos. Por lo que dependiendo en qué banda de frecuencia se trabajando, se puede conseguir un giro a derechas o a izquierdas. En caso del dicroísmo circular, cabe destacar el registrado para la primera de las resonancias donde se alcanza un valor de $\Delta = 0.08$, siendo uno de los valores más altos registrados entre todas las estructuras.



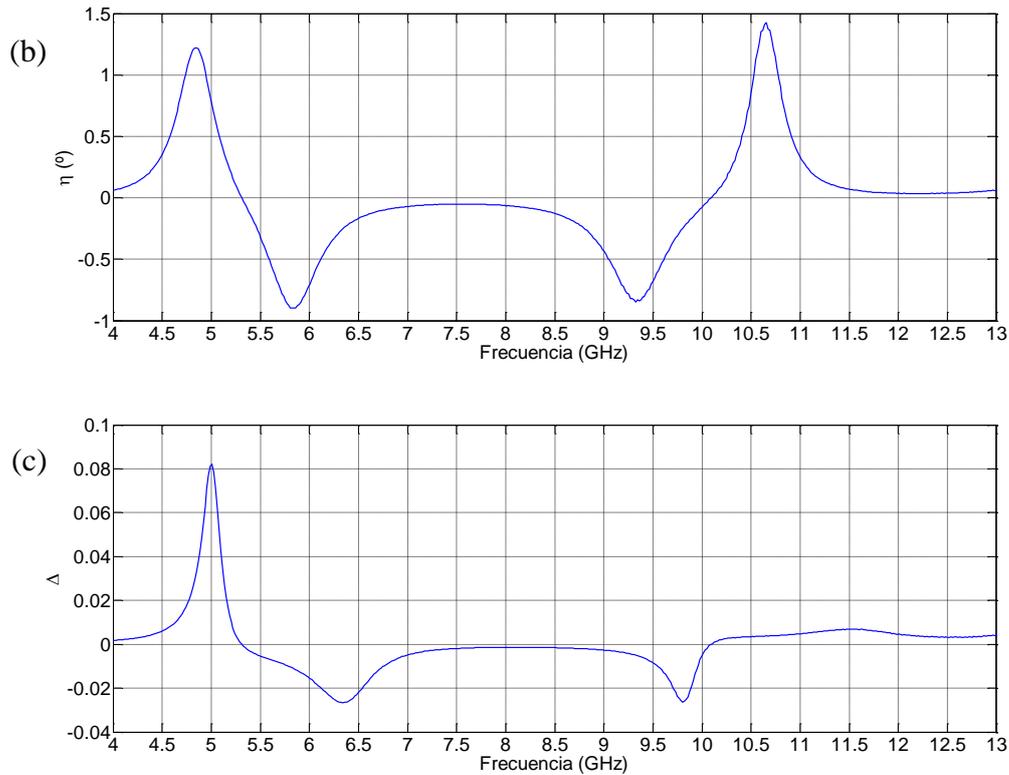
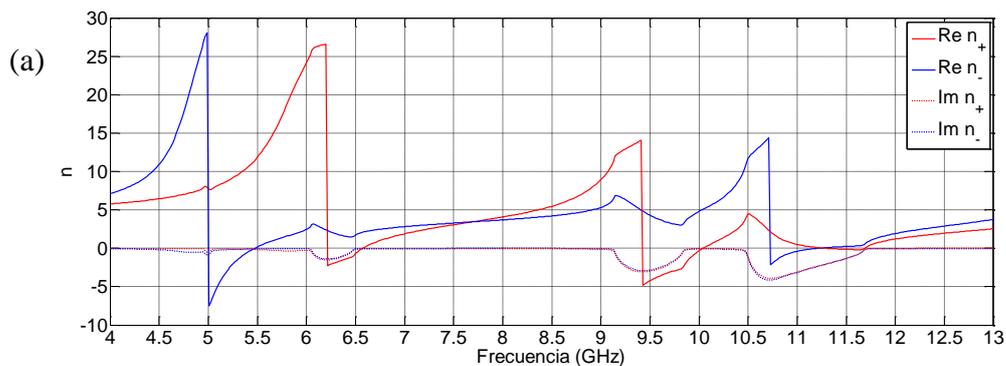


Figura 38: Dependencia de la frecuencia con la actividad óptica, (a) rotación del plano de polarización (b) elipticidad y (c) dicroísmo circular.

En cuanto a la caracterización electromagnética, Fig. 39, se observa como para la primera banda el índice de refracción negativo para la componente CPI (n_-) se sitúa en frecuencias más bajas que para la componente CPD (n_+), mientras que en la segunda de las bandas se intercambian. Los mejores resultados de índice de refracción negativos se obtienen para la primera resonancia de cada banda.

Como complemento, se representan los resultados relativos a la quiralidad, la permitividad y la permeabilidad, para caracterizar plenamente a la estructura.



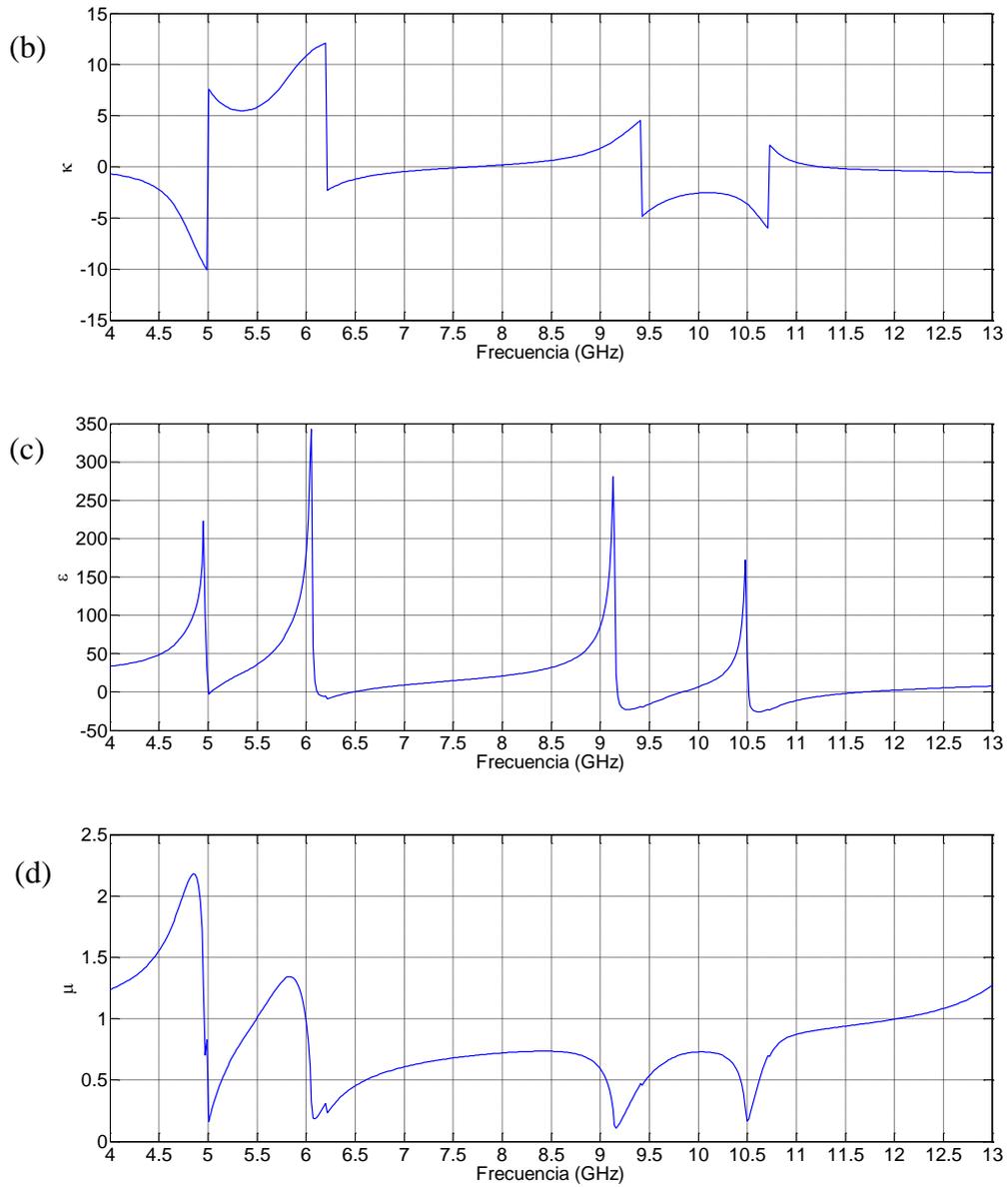


Figura 39: Variación de la frecuencia con la caracterización electromagnética, (a) índice de refracción de la onda electromagnética para la componente CPD (n_+) y para CPI (n_-), (b) parámetro de quiralidad, (c) parámetro permitividad y (d) parámetro permeabilidad.

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

Los metamateriales quirales presentan características muy interesantes en el campo de la propagación de las ondas electromagnéticas debido a las propiedades que los diferencian respecto a los quirales y frente a los metamateriales. Entre esas peculiaridades destacan los altos valores de la rotación del plano de polarización y del dicroísmo, así como un procedimiento más simple para la obtención de un índice de refracción negativo.

En este trabajo, se ha realizado una caracterización paramétrica de dos MTMQ implementados sobre circuito impreso: estructura “Cruces” y estructura “Eles”. Esta caracterización permite determinar qué configuraciones geométricas presentan mejores propiedades: índice de refracción negativo, altos valores de rotación del plano de polarización o elevado dicroísmo circular.

En la estructura “Cruces” el signo y la magnitud de la quiralidad dependen principalmente del giro relativo entre cruces (ϕ). Sin giro mutuo la estructura deja de ser quiral y a medida que este giro mutuo aumenta lo hace el valor de la rotación y quiralidad. Giros de misma magnitud pero signos contrarios presentan los mismos valores de rotación, elipticidad y quiralidad pero con signos cambiados e índices de refracción para la onda CPD y CPI intercambiados. El grado de quiralidad no depende únicamente de la interacción entre las metalizaciones de la celda unidad, sino también del acoplo con las celdas vecinas. Variables como la anchura de la celda unidad o el giro absoluto (ϕ_0) modifican dicho acoplo condicionando así la magnitud y el signo de la quiralidad.

Por otro lado, en la estructura “Eles”, se ha mostrado como una estructura más robusta en su respuesta electromagnética con respecto a la variación de sus parámetros geométricos. En general la modificación de los parámetros geométricos solo genera un desplazamiento en frecuencia de la respuesta electromagnética. De manera particular, los parámetros anchura de la metalización (w) y separación entre eles (d) son los que si modifican la respuesta de la estructura. El parámetro d condiciona la magnitud de la quiralidad y la rotación del plano de polarización.

Una vez estudiadas las estructuras, se ha propuesto una nueva estructura MTMQ en circuito impreso, como combinación de los dos diseños analizados previamente. En este sistema, destaca la aparición de dos bandas de trabajo, por lo que se trata de un sistema bi-banda. Además ambas bandas presentan una rotación del plano de polarización similar $\theta = 58.71^\circ$ en la primera banda y $\theta = -51.15^\circ$ en la segunda.

Una vez realizado este estudio, existen numerosas líneas de investigación a plantear en un futuro, las cuales pueden ser las siguientes:

Una primera propuesta, es la comprobación de los resultados presentados en este trabajo de forma experimental, con el fin de mostrar la concordancia entre los datos obtenidos mediante la simulación y los registrados experimentalmente, deduciendo las posibles limitaciones que presenta el sistema y los métodos de caracterización.

Otra línea de investigación, como continuación de este trabajo, es la de buscar diferentes ecuaciones que modelen el comportamiento presentado por las gráficas, de manera que se podría obtener los resultados de forma previa a la simulación.

Por último, la vía de estudio más importante es la implementación de este tipo de estructuras, para desarrollar y fabricar materiales y/o dispositivos capaces de aportar las diferentes aplicaciones de los metamateriales quirales como la invisibilidad, la superresolución y/o la mejora de ciertos dispositivos como las antenas.

Anexo I.

El siguiente anexo explica de forma breve, la obtención de los coeficientes de transmisión y reflexión de la estructura para ondas circularmente polarizadas que se emplean en el algoritmo de recuperación de parámetros. Estos coeficientes se obtienen a partir de los campos eléctricos planteados en un problema de tres medios, los cuales se obtienen mediante el programa Agilent EMPro 3D EM Simulation Software.

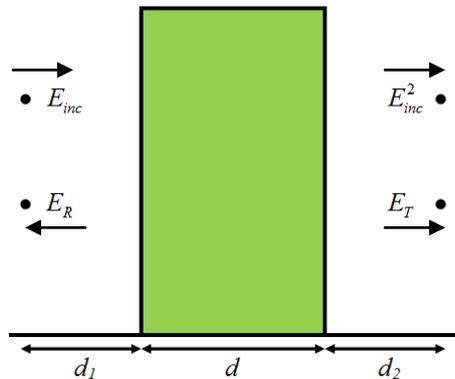


Figura 40: Esquema del problema de los tres medios con los campos eléctricos incidente, reflejado, transmitido y el incidente desplazado.

Para obtener resultados correctos, la toma de datos se realiza en campo lejano, mediante dos sensores uno situado a una distancia d_1 de la superficie del MTMQ para registrar el campo E_R y otro a d_2 que obtiene el E_T . Asimismo, también se realiza una simulación en vacío utilizando los mismos sensores a través de la cual se obtienen los campos E_{inc} y E_{inc}^2 . Los coeficientes de transmisión y reflexión se deben calcular en la superficie del MTMQ luego los campos simulados se desplazan hasta la misma:

$$E_{inc}^S = E_{inc} e^{-j\beta d_1} \quad (A.1)$$

$$E_R^S = E_R e^{j\beta d_1} \quad (A.2)$$

$$E_T^S = E_T e^{j\beta d_2} \quad (A.3)$$

Además se introduce que $E_{inc}^2 = E_{inc} e^{-j\beta(d_1+d+d_2)}$ con el fin de eliminar la magnitud d_2 , por lo que los coeficientes de transmisión y reflexión resultan:

$$T = \frac{E_T^S}{E_{inc}^S} = \frac{E_T \cdot e^{j\beta d_2}}{E_{inc} \cdot e^{-j\beta d_1}} = \frac{E_T \cdot e^{-j\beta d}}{E_{inc} \cdot e^{j\beta(d_1+d_2+d)}} = \frac{E_T \cdot e^{-j\beta d}}{E_{inc}^2} \quad (A.4)$$

$$R = \frac{E_R^S}{E_{inc}^S} = \frac{E_R \cdot e^{j\beta d_1}}{E_{inc} \cdot e^{-j\beta d_1}} = \frac{E_R}{E_{inc}} e^{2j\beta d_1} \quad (A.5)$$

Una vez realizado el desarrollo de forma general se pueden obtener los coeficientes de transmisión de ondas lineales para cada una de las polarizaciones, que son T_{xx} , T_{xy} , T_{yx} y T_{yy} , donde el primer subíndice hace referencia a la polarización del campo transmitido (polarización en x o en y) y el segundo subíndice a la polarización del campo incidente.

Este tipo de coeficientes se pueden relacionar mediante la matriz de Jones [27] (A.6) con los coeficientes de transmisión en el caso de la polarización de ondas circulares, T_{++} , T_{+-} , T_{-+} y T_{--} donde el primer subíndice indica la polarización del campo transmitido (\pm , CPD/CPI) mientras que el segundo al incidente:

$$\begin{pmatrix} T_{++} & T_{+-} \\ T_{-+} & T_{--} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} (T_{xx} + T_{yy}) + i(T_{xy} - T_{yx}) & (T_{xx} - T_{yy}) - i(T_{xy} + T_{yx}) \\ (T_{xx} - T_{yy}) + i(T_{xy} + T_{yx}) & (T_{xx} + T_{yy}) - i(T_{xy} - T_{yx}) \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

En el caso de los coeficientes de reflexión para ondas circularmente polarizadas, R_{++} , R_{+-} , R_{-+} y R_{--} se tiene una expresión similar:

$$\begin{pmatrix} R_{++} & R_{+-} \\ R_{-+} & R_{--} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} (R_{xx} + R_{yy}) + i(R_{xy} - R_{yx}) & (R_{xx} - R_{yy}) - i(R_{xy} + R_{yx}) \\ (R_{xx} - R_{yy}) + i(R_{xy} + R_{yx}) & (R_{xx} + R_{yy}) - i(R_{xy} - R_{yx}) \end{pmatrix} \quad (\text{A.7})$$

A partir de estos coeficientes obtenemos los empleados por el algoritmo de recuperación de parámetros, donde $T_{++} = T_{+}$ y $T_{--} = T_{-}$.

Referencias

- [1]. R. Marqués, F. Martín and M. Sorolla, “Metamaterials with Negative Parameters”, *John Wiley & Sons*, Hoboken, New Jersey, 2008.
- [2]. J. B. Pendry, “Negative refraction”, *Contemporary Physics*, vol. 45, pp. 191–202.
- [3]. J. B. Pendry, “A Chiral Route to Negative Refraction”, *Science*, vol. 306, pp. 1353–1355, 2004.
- [4]. B. Wang, J. Zhou, T. Koschny, M. Kafesaki y C. M. Soukoulis. “Chiral metamaterials: simulations and experiments”, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 11, 114003, 2009.
- [5]. J. Zhou, J. Dong, B. Wang, T. Koschny, M. Kafesaki y C. M. Soukoulis. “Negative refractive index due to chirality”, *Physical Review B.*, vol. 79, 12104, 2009.
- [6]. J. Li, F. Q. Yang y J. F. Dong. “Design and simulation of L-shaped chiral negative refractive index structure”, *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 116, pp. 395-408, 2011.
- [7]. Web site de le red española de metamateriales
<http://grupo.us.es/gmicronda/REME/REME.htm>
- [8]. J. C. Bose. “On the rotation of plane of polarization of electric wave by twisted structure”, *Proc. Roy. Soc.*, vol. 63, pp. 146 - 152, 1898.
- [9]. V. G. Veselago. “The electrodynamics of substances with simultaneous negative values of ϵ and μ ”, *Sov. Phys.-Usp*, vol. 47, pp. 509 - 514, 1968.
- [10]. E. Yablonovitch, “Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, pp. 2059 - 2062, 1987.
- [11]. J.B Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins y W. J. Steward. “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena”, *IEEE Trans. Mirow. Theory Tech.*, vol. 47, 2075, 1999.
- [12]. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser y S. Schultz. “Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, pp. 4184-7, 2000.
- [13]. <http://ohmios.es/2013/12/18/metamateriales/>
- [14]. Constantine A. Balanis “Advanced Engineering Electromagnetics”. Capítulo 5.7 Metamateriales.
- [15]. C. Caloz y T. Utoh, “Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave” Tema 2. Fundamentals of LH MTMs.
- [16]. Ministerio de defensa. “Los metamateriales y sus aplicaciones en defensa”, Monografías del SOPT.
- [17]. I.V. Lindell, A.H. Sihvola, S.A. Tretyakov, A.J. Viitanen, “Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media”. Boston: Artech House, 1994.
- [18]. D.L. Jaggard y Mickelson Papas, “On electromagnetic waves in Chiral medio ”, *Appl. Phys.*, vol.18. pp. 211 - 216, 1979.
- [19]. José Margineda, Gregorio J. Molina-Cuberos, María José Núñez y Marta Rojo. “Sistema experimental en medio libre para caracterización electromagnética de

- medios quirales artificiales”, *XVIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio URSI*, Universidade da Coruña, 2003.
- [20]. Ana Grande, Ana C.L. Cabeceira, I. Barbara y J. Represa. “Modelo FDTD para la propagación de Electromagnética en medios Bi-isotropos”, *XVIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio URSI*, Universidade da Coruña, 2003.
- [21]. R. Zhao, T. Koschny y C. M. Soukoulis. “Chiral metamaterials: retrieval of the effective parameters with and without substrate”, *Optics Express*, vol.18, No. 14, 14553, 2010.
- [22]. Z. Li, M. Mutlu y E. Ozbay. “Chiral metamaterials: from optical activity and negative refractive index to asymmetric transmission”, *J. Opt*, vol. 15, 23001, 2013.
- [23]. S .Tretyakov, I. Nefedov, A. Sihvola, S. Maslovski y C. Simovski. “Waves and energy in chiral nihility”, *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol.17, pp. 695 - 706, 2003.
- [24]. B. Wang, J. Zhou, T. Koschny y C. M. Soukoulis. “Nonplanar chiral metamaterials with negative index”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, 151112, 2009
- [25]. 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”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, 177401, 2006.
- [26]. Web site Agilent EMPro 3D EM Simulation Software
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-4819EN.pdf>, 15-06-2014
- [27]. C. Menzel, C. Rockstuhl y F. Lederer. “Advanced Jones calculus for the classification of periodic metamaterials”, *Physical Review A.*, vol. 82, 53811, 2010.